



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Química

DANILO SILVA BRAZ

PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL DE AVIAÇÃO EM BIORREFINARIAS ANEXAS A  
FÁBRICAS KRAFT DE CELULOSE DE EUCALIPTO: AVALIAÇÃO TÉCNICO-  
ECONÔMICA, DE CICLO DE VIDA E TOMADA DE DECISÃO POR MÚLTIPLOS  
CRITÉRIOS

JET FUEL PRODUCTION IN BIOREFINERIES COUPLED TO EUCALYPTUS KRAFT  
PULP MILLS: TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS, LIFE CYCLE ASSESSMENT AND  
MULTI-CRITERIA DECISION MAKING

CAMPINAS

2018

DANILO SILVA BRAZ

PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL DE AVIAÇÃO EM BIORREFINARIAS ANEXAS A  
FÁBRICAS KRAFT DE CELULOSE DE EUCALIPTO: AVALIAÇÃO TÉCNICO-  
ECONÔMICA, DE CICLO DE VIDA E TOMADA DE DECISÃO POR MÚLTIPLOS  
CRITÉRIOS

JET FUEL PRODUCTION IN BIOREFINERIES COUPLED TO EUCALYPTUS KRAFT  
PULP MILLS: TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS, LIFE CYCLE ASSESSMENT AND  
MULTI-CRITERIA DECISION MAKING

*Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Química  
da Universidade Estadual de Campinas como parte dos  
requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Química.*

Dissertation presented to the School of Chemical Engineering  
of the University of Campinas in partial fulfillment of the  
requirements for the degree of Master in Chemical Engineering.

*Orientador:* ADRIANO PINTO MARIANO

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA  
DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO DANILO SILVA  
BRAZ E ORIENTADA PELO PROF. DR. ADRIANO PINTO  
MARIANO.

CAMPINAS  
2018

**Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s):** CNPq, 132139/2017-0

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

B739p      Braz, Danilo Silva, 1993-  
Produção de combustível de aviação em biorrefinarias anexas a fábricas kraft de celulose de eucalipto : avaliação técnico-econômica, de ciclo de vida e tomada de decisão por múltiplos critérios / Danilo Silva Braz. – Campinas, SP : [s.n.], 2018.

Orientador: Adriano Pinto Mariano.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Biocombustível. 2. Aviação. 3. Eucalipto. 4. Avaliação econômica. 5. Avaliação do ciclo de vida. I. Mariano, Adriano Pinto, 1978-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Jet fuel production in biorefineries coupled to eucalyptus kraft pulp mills : techno-economic analysis, life cycle assessment and multi-criteria decision making

**Palavras-chave em inglês:**

Biofuel

Aviation

Eucalyptus

Economic evaluation

Life cycle assessment

**Área de concentração:** Engenharia Química

**Titulação:** Mestre em Engenharia Química

**Banca examinadora:**

Adriano Pinto Mariano [Orientador]

Rubens Maciel Filho

Edvaldo Rodrigo de Moraes

**Data de defesa:** 19-02-2018

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Química

Folha de Aprovação da Dissertação de Mestrado defendida por Danilo Silva Braz em 19/02/2018, pela Comissão Examinadora constituída pelos Doutores:

---

Prof. Dr. Adriano Pinto Mariano  
Orientador

---

Prof. Dr. Rubens Maciel Filho  
Membro

---

Dr. Edvaldo Rodrigo de Moraes  
Membro

Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

## DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho especialmente à minha mãe e meu pai: por todo esforço, luta e amor de sempre. Também a todos os amigos que estiveram comigo nessa caminhada, em especial a Nikolai Lantaler (*in memoriam*).

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Nelson e Sandra, por todo esforço, luta e amor de sempre.

À minha irmã Taline, por sua eterna alma de criança.

Aos meus grandes amigos Ícaro e Emerson, por todo companheirismo, diversão e momentos marcantes desde o início da graduação.

Aos amigos do vôlei, em especial a Kaique, Caio, Hugo e Esperança, por todas as risadas durante esses anos.

À Bia, por todo amor.

Ao “Chatão”, pela forte parceria desenvolvida e amor incondicional envolvido.

*“Tudo, tudo, tudo vai, tudo é fase, irmão. Logo  
mais vamo arrebentar no mundão...”*

*(Mano Brown - Racionais Mc's)*

## RESUMO

*Três opções de biorrefinarias retrofit acopladas a usinas kraft de celulose de eucalipto pelo compartilhamento de biomassa, energia elétrica e vapor para produção de combustível de aviação (CA) foram avaliadas. A Rota A baseada no etanol produzido a partir da madeira de eucalipto. A Rota B pela conversão da mistura ABE (acetona, n-butanol e etanol) também gerada pelo eucalipto, sendo avaliados dois tipos de microrganismo fermentativos: normal e geneticamente modificado (GMO). A Rota C a partir da lignina kraft extraída do licor preto. Os projetos foram tratados em duas fases visando mitigar riscos técnicos e econômicos. A Rota C mostrou-se inviável economicamente para esse tipo de projeto devido à baixa conversão de lignina em CA. As Rotas A, B (Normal) e B (GMO) apresentaram, respectivamente, preços mínimos de venda (MSP) de 1,75, 2,83 e 1,74 US\$/l para uma taxa interna de retorno (TIR) meta de 20% e reduções do potencial de aquecimento global (GWP), comparado ao CA fóssil, entre 86-93%, 57-91% e 61-82%, dependendo do tipo de alocação utilizado. A aplicação de um método para tomada de decisão por múltiplos critérios (MCDM), levando em consideração aspectos econômicos, de competitividade e ambientais, por meio de simulação Monte Carlo, definiu a Rota A como mais promissora a investimentos. Para as Rotas A e B, a valorização da lignina organosolv produzida no pré-tratamento é oportunidade interessante para tornar o preço do CA mais competitivo frente ao do mercado brasileiro, 0,43 US\$/l.*



## ABSTRACT

*Three chemical routes of retrofit biorefineries coupling with eucalyptus kraft pulp mills were evaluated. The facilities were coupled through biomass, electricity and process steam sharing for jet fuel production. Route A consists on the production of ethanol from eucalyptus wood chips. Route B consists on the conversion of ABE mixture (acetone, n-butanol and ethanol) also produced from eucalyptus. On Route B, there are compared two types of fermentative yeast: normal and genetically modified organism (GMO). Route C uses lignin extracted from black liquor, which comes from cellulosic kraft facility. The studies and evaluations were conducted considering two steps of plant construction, aiming the mitigation of technical and economic risks. Route C was found to be economically unfeasible, due to low conversion of lignin into jet fuel. Routes A, B (Normal) and B (GMO) have showed, respectively, minimum selling prices of 1.75, 2.83 and 1.74 US\$/liter of jet fuel. These values were obtained considering as a goal an internal rate of return of 20%. Also, it was aimed reductions of global warming potential (compared to the fossil jet fuel) between 86-93%, 57-91% and 61-82%, depending on the type of allocation. Through the application of a multi-criteria decision making and Monte Carlo simulations, Route A has been shown to be the most promising to investments, considering economic, competitiveness and environmental aspects. For routes A and B, the valorization of organosolv lignin, produced on the pre-treatment step, was found to be an interesting opportunity, in order to increase competitiveness in Brazilian market. Jet fuel price, in this case, was found to be 0.43 US\$/L.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1: Meta global do setor de aviação para redução da pegada de carbono .....	19
Figura 2.1: Três rotas propostas para produção de CA em uma usina kraft de celulose de eucalipto .....	21
Figura 4.1: Estrutura da biomassa lignocelulósica .....	23
Figura 4.2: Esquema de uma usina kraft de celulose .....	27
Figura 4.3: Possíveis biorrefinarias a serem implantadas em uma usina kraft de celulose .....	28
Figura 4.4: Algumas rotas para obtenção de CA renovável .....	30
Figura 4.5: Maturidade tecnológica de algumas rotas para produção de CA renovável .....	31
Figura 4.6: Esquema resumido das fases de uma avaliação de ciclo de vida .....	35
Figura 4.7: Esquema explicativo da técnica de MCDM .....	38
Figura 5.1: Influência das diversas etapas do ciclo de vida sob os custos do projeto .....	43
Figura 5.2: Fluxogramas das Rotas A, B e C avaliadas para produção de CA .....	44
Figura 5.3: Principais correntes da usina kraft utilizada para o acoplamento com as biorrefinarias .....	50
Figura 5.4: Delimitação das fronteiras do sistema para a ACV .....	52
Figura 6.1: Influência da escala da unidade Lignoboost na TIR do projeto (somente Fase 1) .....	56
Figura 6.2: Comportamento do preço mínimo de venda do CA para a Rota C com implantação da Fase 2 do projeto (unidade LTJ) .....	57
Figura 6.3: Principais correntes de processo para as três opções avaliadas .....	59
Figura 6.4: Comportamento do preço mínimo de venda do CA renovável frente a valorização da lignina organosolv (vendida após o quinto ano) para as três opções avaliadas .....	60
Figura 6.5: Distribuição cumulativa do preço de venda do CA para as três opções avaliadas .....	61
Figura 6.6: Resultado da simulação Monte Carlo para a análise técnico-econômica em <i>boxplot</i> * .....	62
Figura 6.7: Comportamento do preço mínimo de venda do CA de acordo com a quantidade de biomassa seca processada e ano de implantação da Fase 2 para Rota A .....	63

Figura 6.8: Análise de sensibilidade sobre o caso base da Rota A, onde as barras vermelhas e azuis representam, respectivamente, aumento e diminuição da variável em 20% .....	66
Figura 6.9: Comportamento do preço mínimo de venda do CA de acordo com a quantidade de biomassa seca processada e ano de implantação da Fase 2 para Rota B (Normal) .....	67
Figura 6.10: Análise de sensibilidade sobre o caso base da Rota B (Normal), onde as barras vermelhas e azuis representam, respectivamente, aumento e diminuição da variável em 20% .....	69
Figura 6.11: Comportamento do preço mínimo de venda do CA de acordo com a quantidade de biomassa seca processada e ano de implantação da Fase 2 para Rota B (GMO) .....	70
Figura 6.12: Análise de sensibilidade sobre o caso base da Rota B (GMO), onde as barras vermelhas e azuis representam, respectivamente, aumento e diminuição da variável em 20% .....	73
Figura 6.13: GWP (alocação por substituição) para as Rotas A, B (Normal) e B (GMO) .....	74
Figura 6.14: Variação do GWP em relação a diferentes formas de alocação dos coprodutos para as três rotas estudadas .....	75
Figura 6.15: Resultado da simulação Monte Carlo para a MCDM em <i>boxplot*</i> .....	78
Figura 12.1: Distribuição, em <i>boxplot*</i> , obtida para os pesos de cada critério na simulação Monte Carlo da MCDM, sendo o MSP o parâmetro central da distribuição triangular .....	111
Figura 12.2: Distribuição, em <i>boxplot*</i> , obtida para os pesos de cada critério na simulação Monte Carlo da MCDM, sendo a TIR (Fase 1) o parâmetro central da distribuição triangular .....	112
Figura 12.3: Distribuição, em <i>boxplot*</i> , obtida para os pesos de cada critério na simulação Monte Carlo da MCDM, sendo a razão TIC/Produção o parâmetro central da distribuição triangular .....	113

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Avaliações técnico-econômicas para produção de CA renovável.....	40
Tabela 4.2: Avaliações de ciclo de vida para produção de CA renovável .....	41
Tabela 5.1: Conversões das principais etapas das Rotas A e B.....	46
Tabela 5.2: Consumos de vapor e energia elétrica das Rotas A, B (Normal) e B (GMO).....	47
Tabela 5.3: Principais considerações adotadas para a análise técnico-econômica.....	48
Tabela 5.4: OPEX e receitas consideradas na avaliação técnico-econômica .....	49
Tabela 5.5: Utilização dos produtos de acordo com o faseamento adotado para as três rotas .	51
Tabela 6.1: Principais parâmetros técnico-econômicos para as três opções estudadas, considerando projeto com TIR de 20% .....	58
Tabela 6.2: Distribuições definidas para simulação Monte Carlo da análise técnico-econômica .....	61
Tabela 6.3: Discriminação do CAPEX para o caso base da Rota A .....	64
Tabela 6.4: Composição do OPEX e Receitas para o caso base da Rota A .....	65
Tabela 6.5: Discriminação do CAPEX para o caso base da Rota B (Normal).....	68
Tabela 6.6: Composição do OPEX e Receitas para o caso base da Rota B (Normal) .....	68
Tabela 6.7: Discriminação do CAPEX para o caso base da Rota B (GMO).....	71
Tabela 6.8: Composição do OPEX e Receitas para o caso base da Rota B (GMO) .....	72
Tabela 6.9: Critérios de diferentes categorias selecionados para aplicação da MCDM.....	77
Tabela 9.1: Balanço de massa e energia detalhado para o caso base da Rota A .....	90
Tabela 9.2: Balanço econômico detalhado para o caso base da Rota A.....	93
Tabela 9.3: Resultado detalhado da ACV para o caso base da Rota A .....	96
Tabela 10.1: Balanço de massa e energia detalhado para os casos bases das Rotas B (Normal) e (GMO) .....	98
Tabela 10.2: Balanço econômico detalhado para os casos bases das Rotas B (Normal) e (GMO) .....	101
Tabela 10.3: Resultado detalhado da ACV para o caso base da Rota B (Normal) .....	104

Tabela 10.4: Resultado detalhado da ACV para o caso base da Rota B (GMO) .....	106
Tabela 11.1: Balanço de massa e energia detalhado para o caso base da Rota C .....	108
Tabela 11.2: Balanço econômico detalhado para o caso base da Rota C .....	109

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABE: Acetona, n-butanol e etanol

ACV: Avaliação de ciclo de vida

AHP: *Analytical Hierarchy Process*

ANP: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

APR: Reforma em fase aquosa

ASTM: *American Society for Testing and Materials*

ATJ: Álcool para jet fuel

BTL: Biomassa para combustíveis

CA: Combustível de aviação (jet fuel)

CAPEX: Capital fixo

EPA: US *Environmental Protection Agency*

EPE: Empresa de Pesquisa Energética

FTJ: Fermentação para jet fuel

GMO: Organismo geneticamente modificado

GWP: Potencial de aquecimento global

HDCJ: Hidrotratamento de material celulósico despolimerizado

HEFA: Hidroprocessamento de ésteres e ácidos graxos

IATA: *International Air Transport Association*

ICAO: *International Civil Aviation Organization*

iNDC: *intended Nationally Determined Contribution*

ISO: *International Organization for Standardization*

LTJ: Lignina para jet fuel

MAUT: *Multi Attribute Utility Theory*

MCDM: Tomada de decisão por múltiplos critérios

MMA: Ministério do Meio Ambiente

MSP: Preço mínimo de venda

ONU: Organização das Nações Unidas

OPEX: Custo operacional

RTMU: Resistência a incertezas do mercado

SAUFG: *Sustainable Aviation Fuels Users Group*

SIP: *Synthesized iso-paraffins*

SKA: *Synthetic paraffinic kerosene with aromatics*

SPK: *Synthetic paraffinic kerosene*

TIC: Custo total de capital fixo

TIR: Taxa interna de retorno

VPL: Valor presente líquido

WWF: *World Wide Fund for Nature*

## SUMÁRIO

1	Introdução.....	18
2	Objetivos .....	21
2.1	Geral.....	21
2.2	Específicos .....	21
3	Principais Contribuições .....	22
4	Revisão Bibliográfica.....	23
4.1	Biomassa .....	23
4.2	Biorrefinarias .....	24
4.2.1	Riscos e Incertezas .....	24
4.2.1.1	Riscos técnicos.....	25
4.2.1.2	Riscos de mercado .....	25
4.2.1.3	Riscos ao negócio principal .....	25
4.3	Fábrica de celulose.....	26
4.3.1	Funcionamento de uma planta kraft .....	26
4.3.2	Possibilidade de biorrefinarias em uma planta kraft .....	28
4.4	Combustível de aviação (jet fuel) .....	29
4.4.1	Rotas para obtenção .....	29
4.4.1.1	Álcool para jet fuel (ATJ).....	31
4.4.1.2	Lignina para jet fuel (LTJ).....	32
4.4.2	Classificações dos biocombustíveis de aviação (biojets).....	32
4.5	Indicadores econômicos.....	33
4.5.1	Valor presente líquido (VPL).....	33
4.5.2	Taxa interna de retorno (TIR) .....	34
4.5.3	Tempo de retorno do investimento descontado.....	34
4.6	Avaliação de ciclo de vida (ACV) .....	34
4.6.1	Categorias de impacto .....	36
4.6.2	Alocação.....	37



4.7	Tomada de decisão por múltiplos critérios (MCDM).....	37
4.8	Trabalhos existentes.....	39
5	Metodologia .....	43
5.1	Descrição do processo .....	45
5.1.1	Rotas A (etanol) e B (ABE) .....	45
5.1.2	Rota C (lignina).....	47
5.2	Avaliação técnico-econômica .....	48
5.3	Avaliação de ciclo de vida (ACV) .....	51
5.4	Tomada de decisão por múltiplos critérios (MCDM).....	53
6	Resultados e Discussão .....	55
6.1	Avaliação técnico-econômica .....	55
6.1.1	Rota C (lignina).....	55
6.1.2	Rotas A (etanol) e B (ABE) - Comparação Geral .....	57
6.1.3	Rota A .....	62
6.1.4	Rota B (Normal).....	66
6.1.5	Rota B (GMO).....	70
6.2	Avaliação de ciclo de vida (ACV) .....	74
6.3	Tomada de decisão por múltiplos critérios (MCDM).....	76
7	Conclusões e Sugestões para próximos trabalhos .....	79
8	Referências Bibliográficas .....	81
9	Apêndice A: Rota A .....	90
10	Apêndice B: Rotas B .....	98
11	Apêndice C: Rota C.....	108
12	Apêndice D: MCDM.....	111

## 1 Introdução

Similarmente a uma refinaria de petróleo, o conceito de biorrefinaria engloba a produção de combustíveis, energia e químicos renováveis a partir de uma matéria-prima: a biomassa (Mayaki *et al.*, 2008). Além do grande apelo ambiental, uma das oportunidades desse tipo de projeto é de diversificar o portfólio de produtos de uma empresa já existente, requerendo mudanças na mentalidade e no modelo de negócio tradicional adotado por essa (Mariano, 2015).

No cenário econômico mundial, as indústrias norte americanas de papel e celulose vêm sofrendo prejuízos consideráveis devido à emergência da China nesse setor. Sendo assim, a transformação dessas usinas para biorrefinarias tornou-se uma questão estratégica para sobrevivência dessas companhias (Chambost *et al.*, 2008). Extrapolando esse panorama para o Brasil, o qual detém grande representatividade no mercado mundial, respondendo por 40% do mercado de celulose de fibra curta, em alguns anos o país pode ser afetado por essa retração (Beddoes, 2016). Dessa forma, estudos que promovam a vitalidade desse tipo de negócio mostram-se fundamentais, destacando-se então as possibilidades de biorrefinarias.

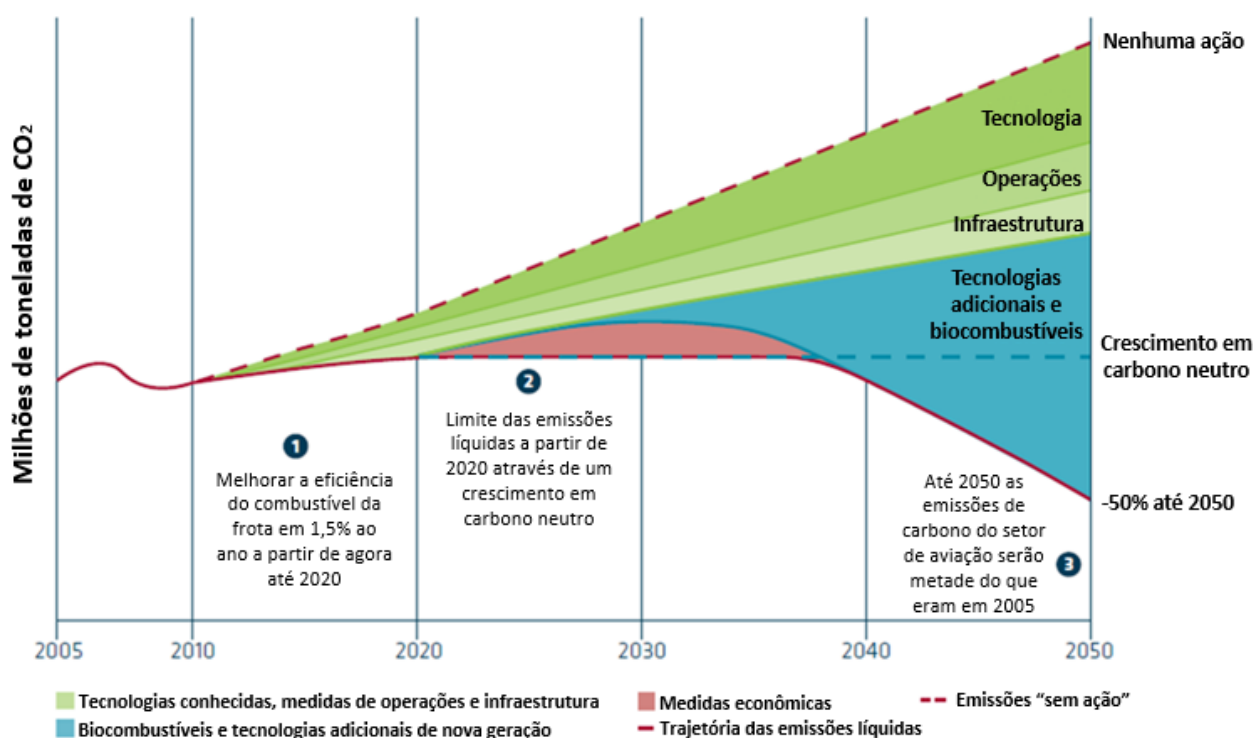
Por outro lado, o setor de aviação está direcionando esforços para reduzir a pegada de carbono gerada em suas atividades, já que é responsável por 2% da emissão antropogênica mundial de gases do efeito estufa. Recentemente criou-se a *Sustainable Aviation Fuels Users Group* (SAUFG), organização global cujo intuito é de acelerar o desenvolvimento e comercialização de biocombustíveis para essa indústria, já que uma das metas planejadas é o crescimento em carbono neutro até 2020 e redução de 50% em relação as emissões do setor em 2005 (Zuckerman, 2015; de Jong *et al.*, 2017). A *Figura 1.1* demonstra esquematicamente a meta global do setor de aviação e os avanços pretendidos em etapas. Nota-se que a substituição do CA convencional por biocombustíveis mostra-se imprescindível para alcançar os objetivos traçados (van Renssen, 2012).

No Brasil, atualmente, existe um déficit entre a demanda e a produção de CA, evidenciando assim uma possibilidade promissora para atuação nesse mercado. Em 2015, quase 20% do CA utilizado no país foi importado (ANP, 2017). Além disso, EPE (2017a) revela projeções de um aumento de 2,6% ao ano na demanda por esse tipo de combustível até 2026, mantendo a produção nacional praticamente constante. No que concerne a questão ambiental, o Brasil vem se comprometendo com ações para que o acréscimo da temperatura média global não ultrapasse o limite de 2°C. Recentemente registrou sua iNDC (*intended Nationally Determined Contribution*) à Convenção de Clima da ONU prometendo reduzir, até 2025, em 37% as emissões de carbono geradas em 2005 (MMA, 2017). Dentre as iniciativas para alcançar tal objetivo, destaca-se a RenovaBio, cujo intuito é de acelerar e ampliar a produção de biocombustíveis no país. Tal projeto já apresentou resultados significativos para introdução do etanol e biodiesel na matriz

brasileira, mas também vem direcionando esforços a fim de incorporar o biogás/biometano e o bioquerosene de aviação no mercado brasileiro de combustíveis (EPE, 2017b).

Sendo assim, Cortez *et al.* (2014) preveem como oportunidade interessante a produção de biocombustíveis a partir da madeira de eucalipto, especialmente o combustível para o setor de aviação, o que implicaria na transformação de usinas de papel e celulose tradicionais em biorrefinarias florestais. Junta-se a isso o fato do CA ser uma demanda mundial e as plantas de papel e celulose estarem presentes na maioria das regiões do planeta, o que proporcionaria maior confiabilidade para cadeia global em relação a produção e abastecimento

Todavia, deve-se ressaltar que a maioria das tecnologias envolvidas em projetos de biorrefinarias são recentes, muitas vezes estando ainda em fase de desenvolvimento. Com isso, não é totalmente claro para os tomadores de decisão qual a opção matéria-prima/tecnologia seria a mais adequada para a produção desse biocombustível. Ademais, mapear as incertezas, riscos técnico-econômicos e os demais pontos críticos são aspectos fundamentais para garantir o sucesso nesse tipo de projeto (Gilani, 2014).



**Figura 1.1:** Meta global do setor de aviação para redução da pegada de carbono

Adaptado de van Renssen (2012)

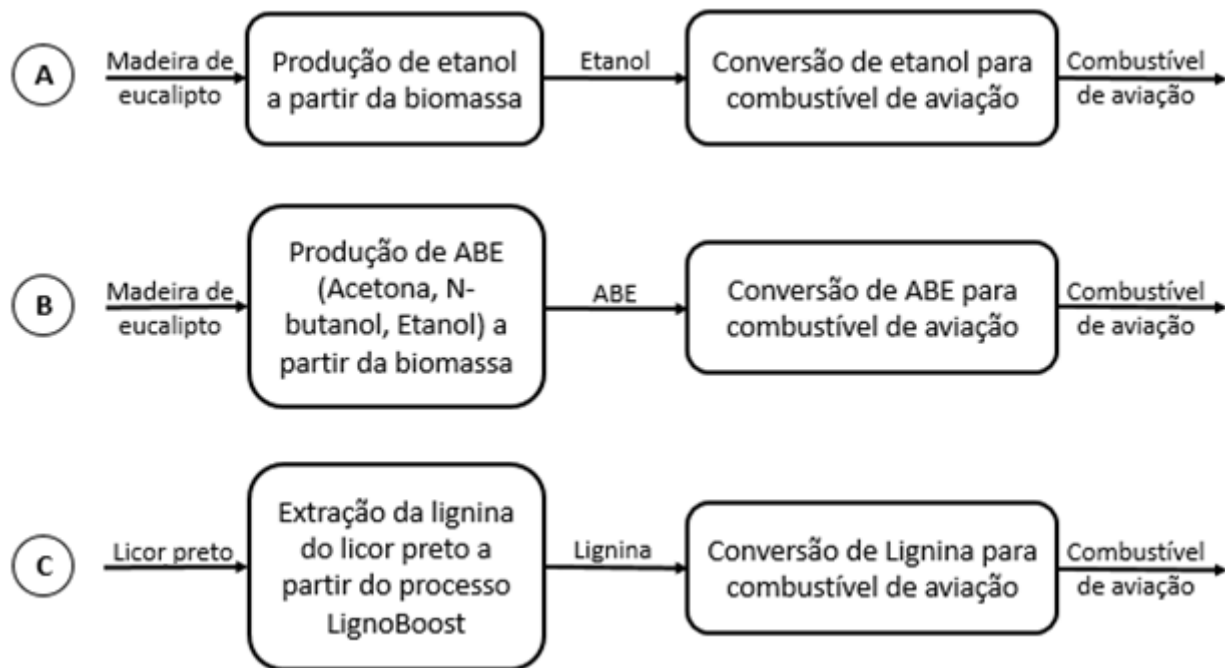
Levando em consideração que usinas kraft de celulose (explicado na seção 4.3.1) são as mais comuns no Brasil, é importante para os investidores nacionais conhecerem e compararem algumas das possibilidades de biorrefinarias atinentes a elas. Dessa maneira, propõe-se com esse

projeto a avaliação de três rotas para produção de CA renovável em uma biorrefinaria resultante da transformação de uma usina de celulose de eucalipto que utiliza o processo kraft.

## 2 Objetivos

### 2.1 Geral

Estudar três alternativas de biorrefinarias anexas a uma usina kraft de celulose para produção de CA renovável, havendo compartilhamento de matéria-prima, energia elétrica, vapor e tratamento de efluentes. A *Figura 2.1* ilustra simplificadaamente as três rotas estudadas.



**Figura 2.1:** Três rotas propostas para produção de CA em uma usina kraft de celulose de eucalipto

### 2.2 Específicos

- i. Elaborar propostas estratégicas visando mitigar os riscos e incertezas identificados para o projeto por meio da técnica de implantação faseada. A implantação em fases prevê investimentos em partes do processo realizados em diferentes tempos, levando-se em conta maturidade tecnológica e aspectos de mercado.
- ii. Avaliar técnico-economicamente as opções de biorrefinarias por meio do preço mínimo de venda, comparando o resultado obtido com o valor do CA convencional no mercado brasileiro.
- iii. Calcular os potenciais de aquecimento global das rotas pela avaliação de ciclo de vida (ACV) e comparar com o do CA de origem fóssil.
- iv. Aplicar um método de tomada de decisão por múltiplos critérios por meio de simulação Monte Carlo, a fim de proporcionar um direcionamento aos investidores por meio da contabilização de aspectos econômicos, ambientais e de competitividade conjuntamente.

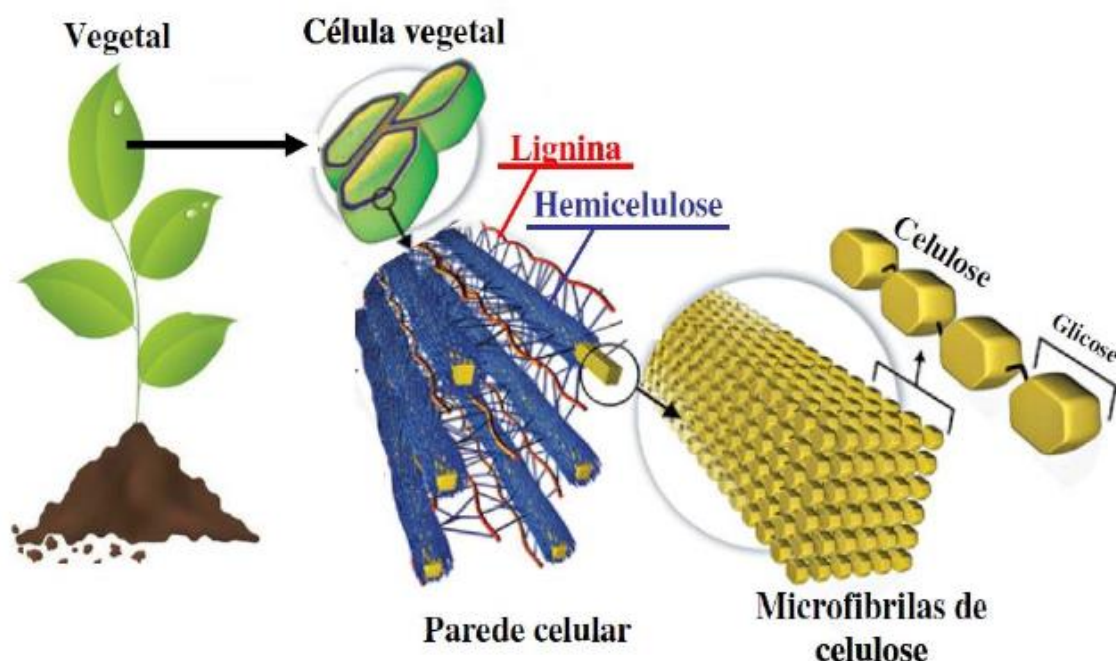
### 3 Principais Contribuições

- i. Estudo de caso do capítulo *III.15 - Clostridia and process engineering for energy generation* para o livro *Green Energy to Sustainability: Strategies for Global Industries*
- ii. Artigo intitulado *Process design and economics of a flexible ethanol-butanol plant annexed to a eucalyptus kraft pulp mil* publicado na revista científica *Bioresource Technology*
- iii. Artigo intitulado *Economic and environmental assessment of implementation strategies of jet fuel production in eucalyptus kraft pulp mills* (em preparação)
- iv. Desenvolvimento e aplicação de uma metodologia de comparação entre biorrefinarias envolvendo aspectos técnicos, econômicos, de competitividade e ambientais
- v. Estudo de biorrefinarias acopladas com usinas kraft de celulose, com estratégias de implantação faseada visando mitigar os riscos do projeto (ainda não há na literatura)

## 4 Revisão Bibliográfica

### 4.1 Biomassa

Biomassa é qualquer material de origem biológica (tanto animal como vegetal), renovável, fundamentalmente constituído por átomos de carbono, que pode ser aproveitado energeticamente. Resíduos agrícolas como palha de milho e bagaço de cana, florestais como a madeira do eucalipto, e os urbanos (lixo produzido pelos seres humanos) são exemplos de diferentes tipos de biomassa. Especificamente o aproveitamento de resíduos vegetais para obtenção de energia e produtos que substituam os de fontes fósseis vem sendo amplamente estudados (de Wild *et al.*, 2011). Tais resíduos também são denominados lignocelulósicos, pois são compostos prioritariamente de celulose, lignina e hemicelulose, como mostrado na *Figura 4.1* (Facundes, 2014).



**Figura 4.1:** Estrutura da biomassa lignocelulósica

Retirado de Facundes (2014)

Celulose é um polímero de cadeia longa linear, constituído apenas por moléculas de glicose (açúcar de seis carbonos). É responsável por conferir o aspecto fibroso do material, interagindo por ligações de hidrogênio com a hemicelulose, polímero ramificado formado em sua maior parte por moléculas de xilose (açúcar de cinco carbonos), além de outros açúcares. Já a lignina é um polímero tridimensional bastante complexo, formado por grupos fenólicos, que interagem covalentemente com as moléculas de hemicelulose, sendo encarregada de manter a estrutura vegetal. Além disso, alguns extrativos, compostos inorgânicos, proteínas e outros elementos são encontrados em menores quantidades na composição vegetal (Facundes, 2014).

Para melhor aproveitar os componentes do material lignocelulósico, a fim de produzir energia, biocombustíveis, químicos, polímeros ou outros materiais, diversas tecnologias para conversão da biomassa foram desenvolvidas, as quais são classificadas de acordo com os mecanismos usados para gerar essa transformação. O tratamento térmico, como a combustão, faz uso do calor. O tratamento químico utiliza compostos químicos, geralmente solventes ou ácidos. Já o biológico utiliza microrganismos como leveduras e fungos. Entretanto, o mais comum são as tecnologias que combinam esses fatores, com destaque para as rotas termoquímicas e bioquímicas, sendo a gaseificação um exemplo daquela enquanto a fermentação é dessa (de Wild *et al.*, 2011).

## 4.2 Biorrefinarias

De maneira similar à definição de uma refinaria de petróleo, na qual diversos produtos e combustíveis são obtidos a partir de uma única matéria-prima, o petróleo, Mayaki *et al.* (2008) conceituam biorrefinaria como uma instalação que integra equipamentos e processos para conversão de biomassa com o intuito de produzir combustíveis, energia e químicos renováveis. Além do grande apelo ambiental, devido a menor emissão de CO<sub>2</sub>, esse tipo de projeto está diretamente relacionado a mudanças de mentalidade e do modelo de negócio tradicional de grandes empresas, cujo efeito preponderante é a ampliação do portfólio de produtos oferecidos por elas (Mariano, 2015).

É possível categorizar os projetos de biorrefinarias em: *greenfield*, *retrofit* e *brownfield*. Os *greenfields* dizem respeito à construção de uma planta para processamento da biomassa totalmente nova, ou seja, “do zero”. Já os projetos *retrofits*<sup>\*</sup> tratam da anexação de uma nova tecnologia a uma planta já existente havendo, por exemplo, integração energética entre elas. Uma das principais vantagens desse tipo de projeto é já existir toda uma estrutura, seja física como logística, a qual será aproveitada pela tecnologia a ser agregada: esse é o caso da construção de usinas de etanol 2G integradas a usinas de cana de açúcar tradicionais. Por último, há os projetos *brownfields*, categoria que contempla a utilização da estrutura/equipamentos de plantas desativadas. Ele tem um forte apelo relacionado à reutilização de materiais, entretanto, deve-se ter cuidado com possíveis contaminações (Batsy *et al.*, 2013).

### 4.2.1 Riscos e Incertezas

Um ponto importante no desenvolvimento de qualquer iniciativa é o mapeamento dos riscos relacionados à sua implantação. Segundo estudo realizado com um painel de especialistas em biorrefinarias, Janssen e Stuart (2010) concluíram que uma das principais barreiras para execução

---

<sup>\*</sup>Os conceitos de *retrofit* e *brownfield* foram utilizados nesse trabalho como descrito na seção 4.2. Entretanto, a literatura comporta estudos que consideram esses conceitos trocados (em relação a esse trabalho).



desse tipo de projeto são os diferentes tipos de riscos e incertezas envolvidos. Dessa maneira, identificar, classificar e traçar estratégias para mitigá-los deve ser parte integrante na concepção de uma biorrefinaria.

#### **4.2.1.1 Riscos técnicos**

Muitas das tecnologias disponíveis que devem ser integradas para compor todo processo de uma biorrefinaria estão em diferentes estágios de maturidade tecnológica e não se pode ter certeza de quando estarão totalmente prontas para serem integradas. Enquanto algumas já operam em escala industrial, outras ainda estão em escala piloto ou até mesmo laboratorial, gerando incertezas de que realmente seja possível explorar uma rota que necessita dessa tecnologia ainda em desenvolvimento. Ou seja, há o risco de garantir que o *scale up* será bem-sucedido (Cohen *et al.*, 2010).

Complementa-se a isto o fato das biorrefinarias utilizarem operações unitárias bastante particulares, as quais foram pouco ou quase nunca exploradas em grande escala. Ao contrário de tecnologias convencionais, como as de indústrias petroquímicas, visto que essas já são bem consolidadas e tem suas vantagens e inconvenientes amplamente conhecidos (Cohen *et al.*, 2010).

#### **4.2.1.2 Riscos de mercado**

Apesar de muitos países estimularem a redução das emissões de CO<sub>2</sub> por meio de incentivos financeiros a investimentos relacionados a produtos de fonte renovável, ainda há diversos contrapontos mercantis que dificultam a ocorrência de tais projetos. Sem dúvidas, o principal deles está relacionado a alcançar um preço competitivo em comparação aos produtos de fontes não renováveis que já estão no mercado (Vertès *et al.*, 2006).

Além disso, Gilani (2014) evidencia que aspectos como o tamanho do mercado que se almeja, crescimento previsto para o setor, localização da planta para escoamento da produção, possível saturação do mercado e flutuações de preço do produto são fatores que necessitam ser considerados. Cabe também ressaltar a importância de delimitar o mercado alvo cuja produção será dirigida, já que abordagens completamente distintas são tomadas para uma produção de *commodities* ou voltada para produtos de química fina, por exemplo.

#### **4.2.1.3 Riscos ao negócio principal**

Devido à necessidade de integração da biorrefinaria com a planta já existente, seja ela energética, pela matéria-prima utilizada, sistema de tratamento de resíduos etc., há a possibilidade de impacto na qualidade e/ou quantidade da linha de produção principal. Por exemplo, uma biorrefinaria anexa a uma planta de celulose poderia provocar modificações na umidade da polpa

produzida, prejudicando assim a cadeia produtor-comprador, além do próprio processo que era realizado anteriormente à incorporação (Gilani, 2014).

### **4.3 Fábrica de celulose**

É indiscutível a importância do setor de celulose para a sociedade ao longo dos anos e, mesmo nos dias de hoje, com avanços tecnológicos que promovem grande “consumo” de informações por computadores, celulares e outros dispositivos eletrônicos, ainda sim esse tipo de indústria vem crescendo em todo mundo (Vidal e da Hora, 2014). O Brasil é um dos países que vem ganhando destaque nesse panorama, já dominando 40% do mercado global de celulose de fibra curta. Além disso, outra prova é o investimento de quase nove bilhões de reais feito em 2016 pela empresa Fibria, uma das gigantes do setor, que irá dobrar a capacidade produtiva de uma de suas fábricas num momento em que o país encara uma implacável crise econômica (Beddoes, 2016).

A madeira de onde será extraída a celulose pode ser classificada em duas classes: coníferas e folhosas. A primeira tem como principal representante o Pinus, mais facilmente encontrado em países europeus e norte-americanos. É caracterizada por fibras longas que fornecem maior resistência, sendo usada para a produção de sacos de supermercado e embalagens de papelão. Já para as folhosas tem-se o Eucalipto como exemplo, árvore bastante comum no Brasil. Apresenta fibras curtas, sendo utilizada em produtos que requerem maior maciez como papel de seda, de impressão e de limpeza (Vidal e da Hora, 2014).

Com a expansão da indústria de papel e celulose, eclodiram discussões a respeito dos impactos sociais e ambientais causados por elas, como o uso de grandes áreas de plantio com expansões periódicas, utilização de compostos químicos clorados no processo de branqueamento da celulose, emissões de dióxido de carbono etc. Recentemente o setor começou a perceber que mudanças nesses aspectos são fundamentais, já sendo possível encontrar empresas com práticas de manejo florestal sustentável, utilizando químicos menos agressivos, com projetos de biorrefinarias para diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> etc. Dessa forma, visa-se garantir não só melhorias ambientais e sociais, mas também a longevidade do próprio negócio (WWF, 2017).

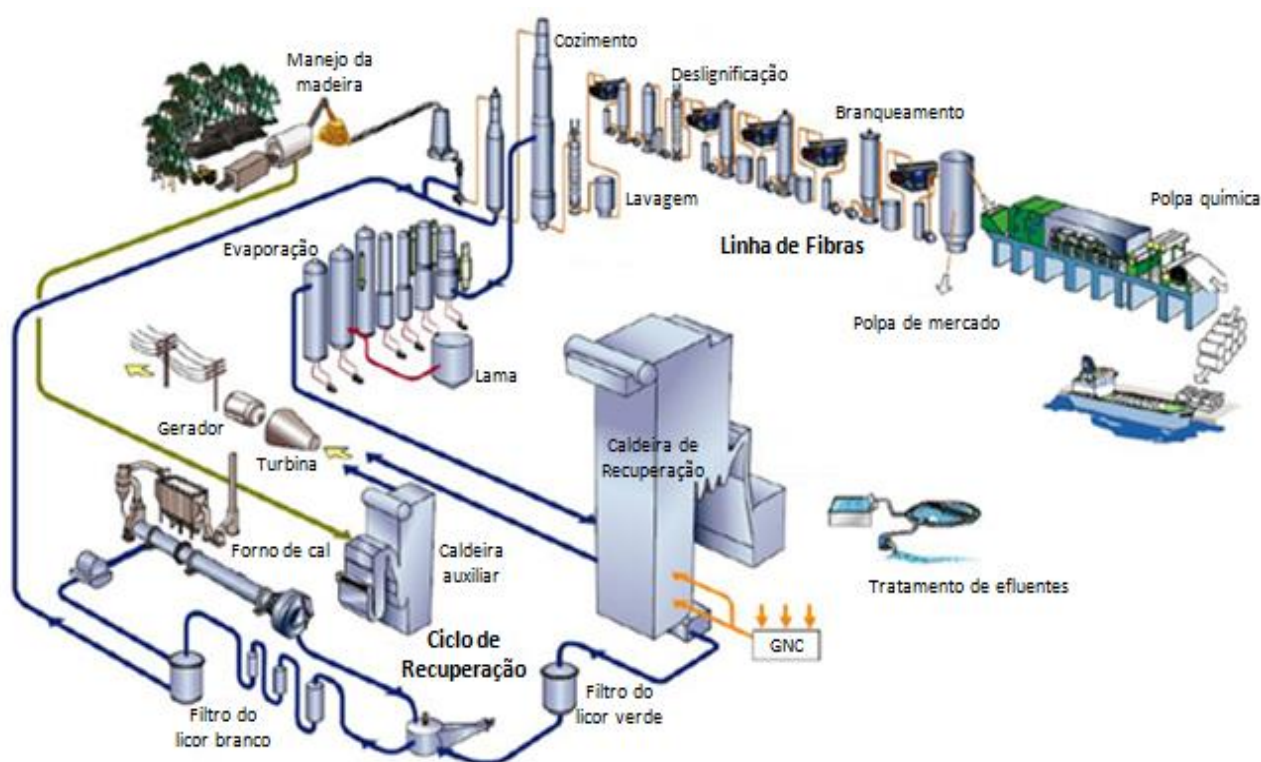
#### **4.3.1 Funcionamento de uma planta kraft**

Os troncos de eucalipto são cortados e, na maioria das vezes, descascados na própria floresta. Em seguida, são levados por caminhões até a usina, onde são picados, dando origem aos cavacos de madeira. Esses são encaminhados ao digestor para cozimento à alta temperatura e pressão com uma mistura de hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na<sub>2</sub>S), denominada licor branco. A principal função desta etapa é desprender as fibras celulósicas e dissolver a lignina presente na madeira (Mehdipoor, 2011).

Do digestor obtêm-se duas correntes, uma de celulose não branqueada e outra denominada licor preto, composta pelos químicos adicionados, lignina e outros compostos da madeira. A corrente rica em celulose segue para uma etapa de deslignificação por oxigênio, cujo intuito é retirar a lignina remanescente, após isso é encaminhada para a etapa de lavagem e branqueamento, onde tratamentos químicos são aplicados para se obter celulose na cor branca, a qual é seca, cortada em folhas e embalada para venda (Mehdipoor, 2011).

Já o licor preto é enviado para uma sequência de evaporadores que irão concentrar a mistura e direcioná-la a caldeira de recuperação. Nela o licor preto é queimado, gerando vapor e energia elétrica para a usina, além de proporcionar a recuperação da fração inorgânica que, diluída em água, é designada licor verde. A esse licor é adicionado óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) para obtenção de licor branco que retornará ao processo de cozimento. Já a lama de cal formada é encaminhada a um forno de cal para recuperação do óxido de cálcio a ser reutilizado no processo (EPA, 1990).

Como na maioria das fábricas de celulose o vapor gerado pela caldeira de recuperação não é suficiente para satisfazer a demanda da usina, utiliza-se uma caldeira adicional para queimar biomassa, gás natural ou qualquer outro combustível e suprir esse déficit (EPA, 1990). A *Figura 4.2* demonstra simplificada o processo kraft descrito.



**Figura 4.2:** Esquema de uma usina kraft de celulose

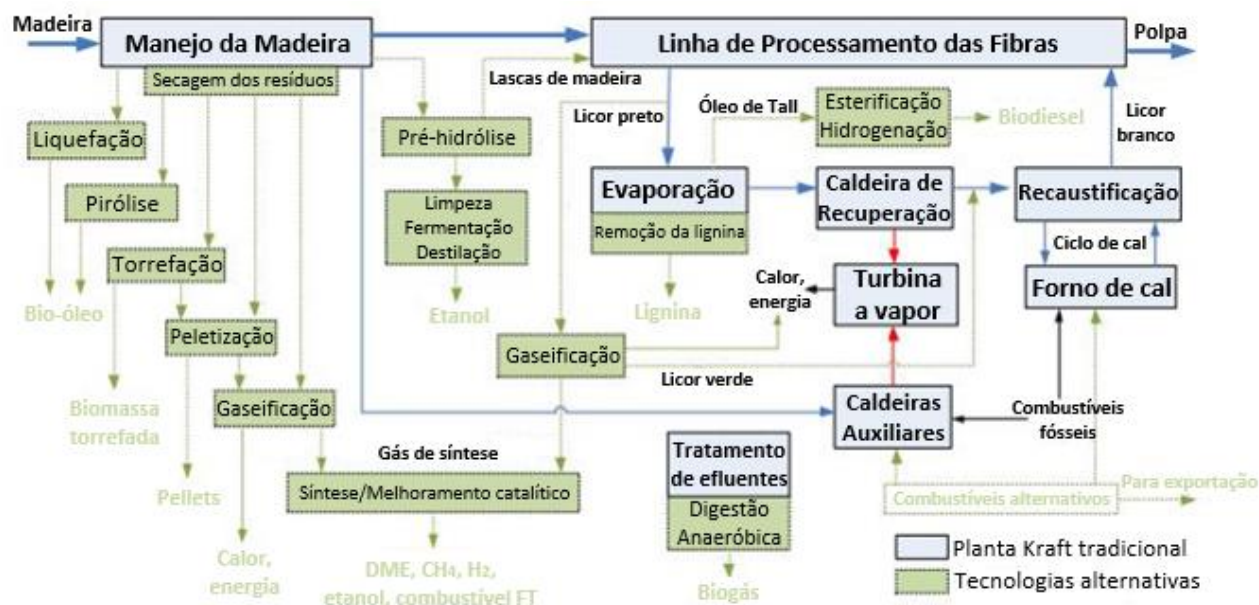
Adaptado de Mehdipoor (2011)

### 4.3.2 Possibilidade de biorrefinarias em uma planta kraft

Há inúmeras formas de projetar uma biorrefinaria com uma usina kraft existente, assim como várias formas de classifica-las: seja pelo produto final obtido, tipo de processo utilizado, entre outras. Uma maneira bastante intuitiva é agrupar em 1) processos que tem como base as correntes do próprio processo kraft e 2) processos que podem ser anexados/integrados à fábrica de celulose (Pettersson *et al.*, 2012).

Para o primeiro grupo, pode-se ter, por exemplo, a extração da hemicelulose da polpa de madeira antes do cozimento via solventes orgânicos, ou até mesmo do licor preto por tratamento térmico, a fim de produzir combustíveis e químicos. Além disso, a lignina também é capaz de ser removida do licor preto a partir do processo Lignoboost, podendo ser queimada em caldeiras para geração vapor/energia ou transformada em produtos químicos (Pettersson *et al.*, 2012).

Já o segundo grupo contempla, por exemplo, a utilização da biomassa para um processo termoquímico (gaseificação, pirólise etc.), a fim de gerar um biogás a ser utilizado na usina kraft. Ou a “combinação” energética com uma planta construída paralelamente (biobutanol, por exemplo), onde as sobras de vapor e energia elétrica de uma são direcionadas para a utilização no outro processo (Pettersson *et al.*, 2012). Algumas possibilidades desses dois grupos são mostradas na Figura 4.3.



**Figura 4.3:** Possíveis biorrefinarias a serem implantadas em uma usina kraft de celulose

Adaptado de Johnson e Hart (2016)

Além disso, é válido ressaltar a possibilidade de biorrefinarias que flexibilizem o processo produtivo da usina kraft, como por exemplo, a instalação de uma planta de produção de etanol em conjunto. Dessa maneira, se o mercado para a celulose está em alta mantém-se a operação

tradicional da planta, caso a demanda diminua, parte ou toda a produção pode ser direcionada para o processo de etanol instalado (Pettersson *et al.*, 2012).

#### 4.4 Combustível de aviação (jet fuel)

O combustível de aviação convencional, também conhecido como querosene de aviação e obtido a partir do refino do petróleo, é uma mistura de hidrocarbonetos cujas frações principais são de parafinas, naftalenos e compostos aromáticos que contém de 8 a 16 átomos de carbono por molécula. Apresenta pegada de carbono em torno de 87,5 g CO<sub>2</sub> eq./MJ e, no mercado brasileiro, a média de preços entre 2003-2014 foi de 0,43 US\$/l (Staples *et al.*, 2014; ANP, 2017). Atualmente, diversos estudos têm direcionado esforços para desenvolver novas tecnologias para a produção desse tipo de combustível, principalmente as que utilizam matéria-prima renovável, permitindo assim a diminuição da emissão de gases causadores do efeito estufa (Mawhood *et al.*, 2014; Bauen *et al.*, 2009).

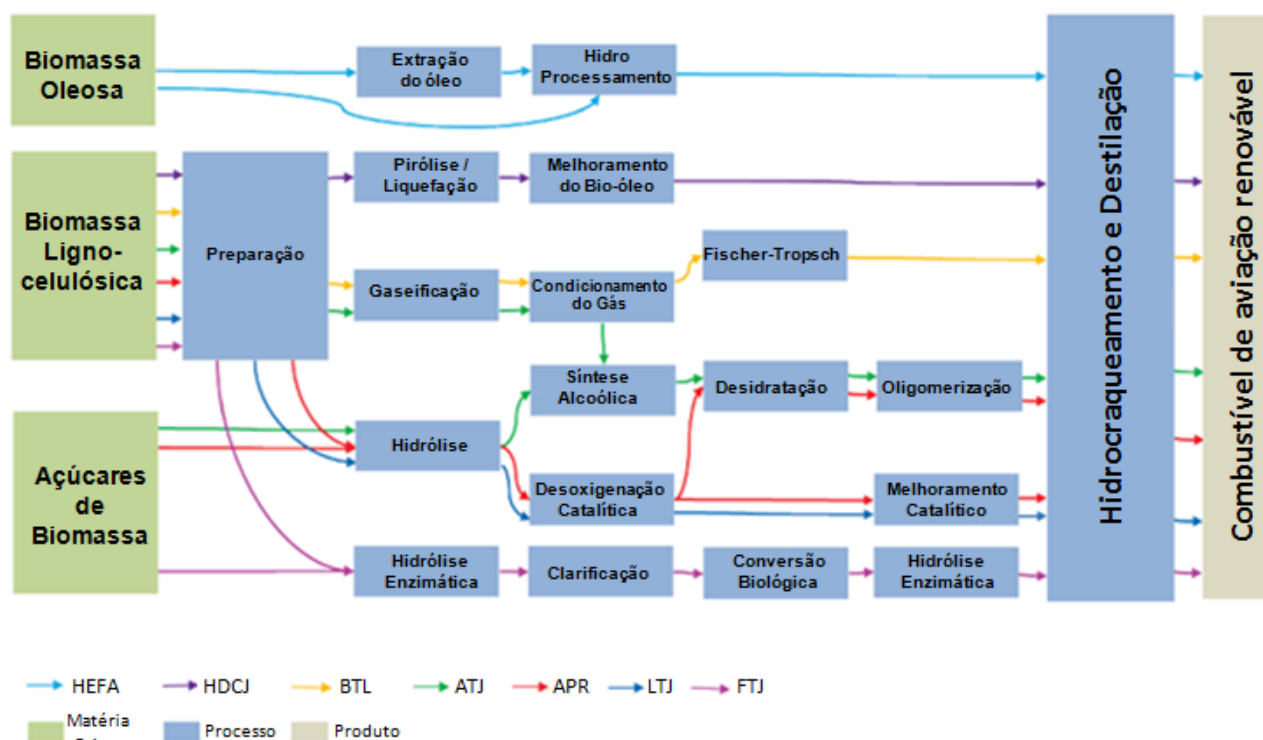
No que diz respeito a essa questão, além do investimento econômico, outro grande desafio é que o combustível produzido a partir das rotas alternativas seja um *drop in*, isso é, que apresente propriedades similares ao convencional e possa ser utilizado nos motores existentes sem necessidade de modificações desses equipamentos. Tal equivalência é norteadada pelo desempenho do combustível, sendo parâmetros como o conteúdo energético, estabilidade térmica, ponto de congelamento, lubricidade, viscosidade e segurança, alguns dos quais devem ser avaliados (Bauen *et al.*, 2009). Devido a essa necessidade de controle das propriedades físico-químicas, a substituição total pelos CA renováveis ainda não é permitida pela *American Society for Testing and Materials International - ASTM International*.

Em torno de 20% do combustível de aviação utilizado no Brasil é importado e o país apresenta uma taxa de crescimento no setor aéreo maior que a média mundial. Por outro lado, cerca de 40% do custo operacional das empresas de aviação está no combustível, além de seu preço sofrer com as oscilações de preço do barril de petróleo. Levando em conta esses aspectos e o fato do Brasil ser referência mundial no aproveitamento energético de biomassa, infere-se que a utilização desse material para produção de CA é uma grande oportunidade para o país (Cortez *et al.*, 2014).

##### 4.4.1 Rotas para obtenção

Além da produção petroquímica convencional, há diversas rotas sendo estudadas com o intuito de produzir CA renovável, como mostrado na *Figura 4.4*. Segundo Mawhood *et al.* (2014), o “Hidroprocessamento de ésteres e ácido graxos (HEFA)” é a rota mais avançada em termos tecnológicos, diferenciando-se das demais por compreender a utilização de óleos vegetais como matéria-prima, os quais são convertidos cataliticamente em CA.

As rotas “Biomassa para combustíveis líquidos (BTL)” e “Hidrotratamento de material celulósico despolimerizado (HDCJ)” utilizam os processos termoquímicos gaseificação e pirólise ou liquefação hidrotérmica, respectivamente. Na primeira rota a biomassa triturada é gaseificada, dando origem a um gás de síntese rico em monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H<sub>2</sub>), o qual passa por um processo catalítico denominado Fischer-Tropsch (FT), convertendo o gás em uma mistura de hidrocarbonetos que podem ser transformados em CA. Já na segunda, os processos utilizados convertem diretamente a biomassa sólida a um líquido (bio-óleo), o qual contém alto teor de água e oxigênio em sua composição, sendo necessários tratamentos termoquímicos para melhorar seu potencial combustível (Mawhood *et al.*, 2014).



**Figura 4.4:** Algumas rotas para obtenção de CA renovável

Adaptado de Mawhood *et al.* (2014)

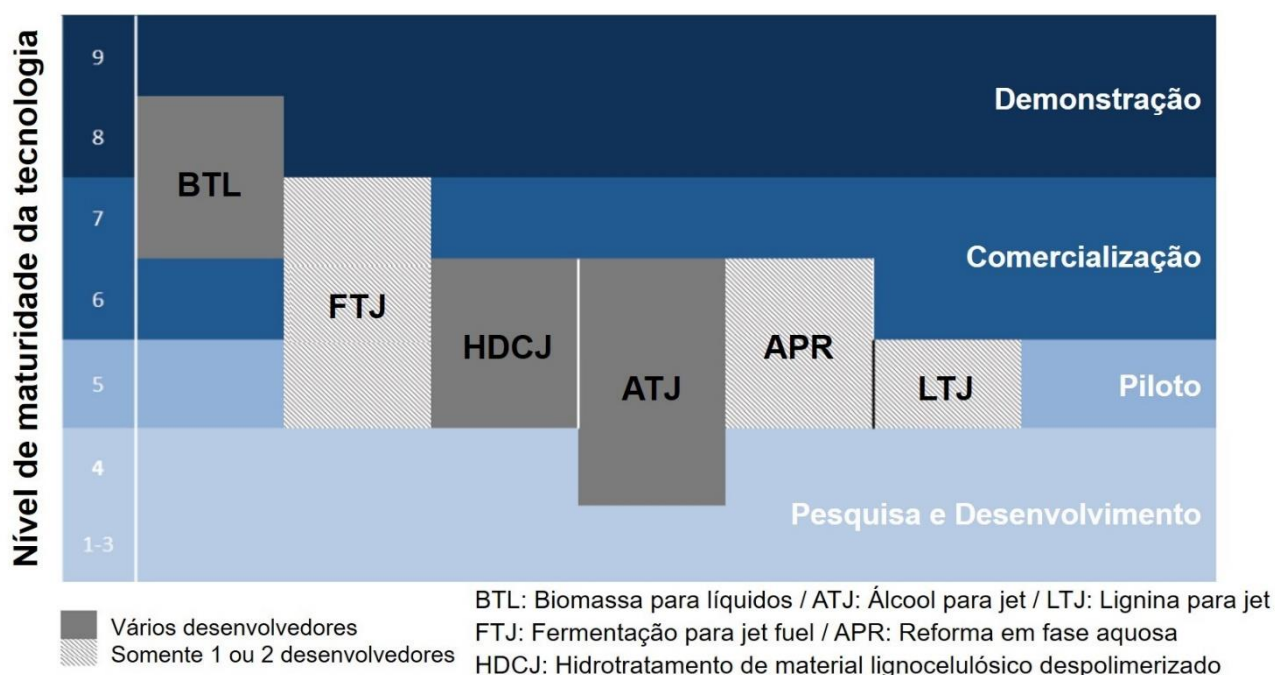
Já a rota “Reforma em fase aquosa (APR)” converte uma solução de açúcares provenientes do material lignocelulósico em intermediários químicos que podem ser transformados em combustíveis líquidos. Tal processo também envolve catalisadores, além da necessidade de pré-tratamento da biomassa para que os açúcares fiquem acessíveis. Por outro lado, esses mesmos açúcares também podem ser convertidos diretamente em alcanos, hidrocarbonetos insaturados, via fermentação anaeróbica usando microrganismos geneticamente modificados, pela rota conhecida como “Fermentação para jet fuel (FTJ)” (Mawhood *et al.*, 2014).



As duas rotas restantes, “Álcool para jet fuel (ATJ)” e “Lignina para jet fuel (LTJ)” são as utilizadas nesse trabalho, estando as Rotas A e B contempladas na primeira categoria, enquanto a Rota C se encaixa na segunda. Dessa forma, elas serão tratadas separadamente e com maiores detalhes nos tópicos seguintes.

#### 4.4.1.1 Álcool para jet fuel (ATJ)

A transformação de álcoois em CA é dada pela desidratação deles com posterior polimerização dos hidrocarbonetos saturados formados. Como mostrado pela *Figura 4.5*, essa plataforma tecnológica ainda não é uma realidade comercial, estando, atualmente, em escala de demonstração (Mawhood *et al.*, 2014). A companhia estadunidense *Gevo* vem produzindo esse tipo de biocombustível em uma planta demo a partir do isobutanol, inclusive com testes já realizados em voos comerciais (Johnston, 2013). Já a empresa *Byogy Renewables* está desenvolvendo uma plataforma para utilizar o etanol e butanol nesse tipo de produção (Biofuels Digest, 2016).



**Figura 4.5:** Maturidade tecnológica de algumas rotas para produção de CA renovável

Adaptado de Mawhood *et al.* (2014)

Devido à emergência da tecnologia do etanol de segunda geração, no Brasil, o processo mais conhecido para obter um álcool a partir de material lignocelulósico se baseia na conversão dos açúcares provenientes da celulose e hemicelulose. O grande gargalo dessa transformação (biomassa para álcool) está no pré-tratamento, etapa na qual a ocorre a desintegração da matriz vegetal, tornando possível o acesso às cadeias de celulose e hemicelulose pelas etapas seguintes (Soares e Rossell, 2009).

Existem diversos tipos de pré-tratamento como explosão a vapor, hidrólise ácida, explosão com amônia e com solventes orgânicos. Esse último consiste em utilizar uma mistura de água com solvente orgânico (etanol, acetona etc.), combinado com alta temperatura e pressão para tratar a biomassa. A tecnologia Organosolv vem ganhando notoriedade por utilizar compostos recuperáveis, que não são muito agressivos ao meio ambiente e equipamentos, além de proporcionar boa separação da lignina. Por outro lado, tem-se a necessidade de instalar uma unidade de recuperação para o solvente, geralmente destilação, além de realimentar parte do solvente, já que a regeneração não é 100% eficiente (Soares e Rossell, 2009; Mesa *et al.*, 2016).

#### 4.4.1.2 Lignina para jet fuel (LTJ)

Obter combustível de aviação utilizando lignina pressupõe que haja uma etapa de despolimerização dela, assim como sua desoxigenação. Ademais, faz-se necessário promover uma etapa catalítica para alcançar a faixa de hidrocarbonetos desejada (Mawhood *et al.*, 2014). Tal tecnologia é bastante recente, estando ainda em escala piloto, como mostrado na *Figura 4.5*. Trata-se de uma única planta inaugurada em 2012 pela empresa *Biochemtex* que, com seu processo denominado *Moghi*, pretende até 2020 estar em escala comercial produzindo dois milhões de toneladas de CA por ano (Cobror, 2014).

Como já comentado na seção 4.3.2, a lignina pode ser obtida em uma usina kraft a partir do licor preto pelo processo Lignoboost, no qual há adição de CO<sub>2</sub> ao licor para acidificá-lo, provocando assim a precipitação de uma pasta rica em lignina, sendo essa filtrada e prensada para remoção do líquido. A torta obtida é precipitada novamente após ser dissolvida em uma solução de licor preto com adição de ácido sulfúrico, com posterior lavagem, filtração e prensagem da mesma (Tomani *et al.*, 2011).

A remoção de lignina do licor preto diminui o poder calorífico da solução que será queimada, gerando vapor e energia elétrica, na caldeira de recuperação. Entretanto, o processo produz lignina sólida com pureza maior que 95%, podendo esta ser utilizada de forma mais eficaz na caldeira de queima, ou destinada a outros fins, como a síntese de químicos e polímeros (Tomani *et al.*, 2011). A empresa canadense *Domtar* já utiliza a tecnologia Lignoboost em uma planta em escala comercial localizada na Carolina do Norte, cuja capacidade anual é de 25000 toneladas de lignina extraída (Domtar, 2013).

#### 4.4.2 Classificações dos biocombustíveis de aviação (biojets)

Os CA renováveis são classificados em três categorias de acordo com a similaridade frente ao de origem fóssil. Tal semelhança é analisada pela distribuição de cadeias carbônicas e quantidade de aromáticos presente. O SIP (*Synthesized iso-paraffins*) é um tipo de biocombustível



bem específico, cujas cadeias possuem 15 átomos de carbono e o conteúdo de aromáticos abaixo do CA convencional. Devido a essas limitações, a máxima mistura permitida com o de origem fóssil é de 10 vol% (ICAO, 2017). O SPK (*Synthetic paraffinic kerosene*) é composto por hidrocarbonetos lineares e ramificados que possuem entre 8 e 16 átomos de carbono. Assim como no SIP, o conteúdo de aromáticos também é menor do que o convencional. Atualmente, misturas com no máximo 50 vol% foram aprovadas pela *ASTM International*. Já o SKA (*Synthetic paraffinic kerosene with aromatics*) é similar ao SPK, porém com conteúdo de aromáticos superior, equiparável ao do convencional. Essa característica permite garantir a lubricidade necessária ao CA, possibilitando a substituição completa frente ao de origem fóssil, ou seja, é um biocombustível *drop in* (IATA, 2010; Pereira *et al.*, 2017).

Atualmente, diversas plataformas de conversão em biocombustíveis foram aprovadas pela *ASTM International* na produção de SIP e SPK. Não há ainda rotas certificadas que produzam SKA. A tecnologia de fermentação direta permite a mistura de apenas 10 vol% pelo fato do CA renovável produzido ser um SIP. Já as rotas ATJ, HEFA e gaseificação de biomassa com FT produzem biocombustíveis SPKs. Para a primeira, a mistura pode conter até 30 vol% de CA renovável. Já para as outras duas pode-se misturar com até 50 vol% (Mawhood *et al.*, 2014; Pereira *et al.*, 2017).

## 4.5 Indicadores econômicos

Para avaliar a chance de sucesso na implantação de um projeto ou a escolha entre várias opções, alguns parâmetros são capazes de nortear a tomada de decisão, os quais são denominados indicadores econômicos. Há diversos critérios, sendo eles adotados de acordo com a preferência do especialista ou empresa que está avaliando o projeto. Entretanto, alguns são usados com mais frequência, devido sua simplicidade de cálculo e relevância histórica comprovada, como o valor presente líquido, a taxa interna de retorno e o tempo de retorno do investimento descontado (Pilão e Hummel, 2003).

### 4.5.1 Valor presente líquido (VPL)

É o somatório de todas as despesas e receitas por período, transferidas para o tempo presente mediante a aplicação de uma taxa de juros (também designada por taxa de desconto), ou seja, demonstra qual será o ganho ou perda financeira com o projeto. Caso o VPL calculado seja maior que zero, o projeto é lucrativo, caso menor, o capital investido não será reavido, denotando o projeto como inviável. É um dos indicadores mais usados por mostrar diretamente o ganho monetário que o projeto pode proporcionar (Botteon, 2009).

#### 4.5.2 Taxa interna de retorno (TIR)

Define-se como a taxa de desconto necessária para que se atinja um valor presente líquido de zero. Se o valor obtido for maior que a taxa de juros considerada no projeto, esse será lucrativo. Já na situação contrária, o projeto resultará em prejuízo ao investidor. Para o caso de igualdade, isso é, TIR igual a taxa de desconto adotada, faz-se indiferente a implantação (nem lucro nem prejuízo), sendo essa circunstância equivalente ao do VPL obtido ser zero (Pilão e Hummel, 2003).

#### 4.5.3 Tempo de retorno do investimento descontado

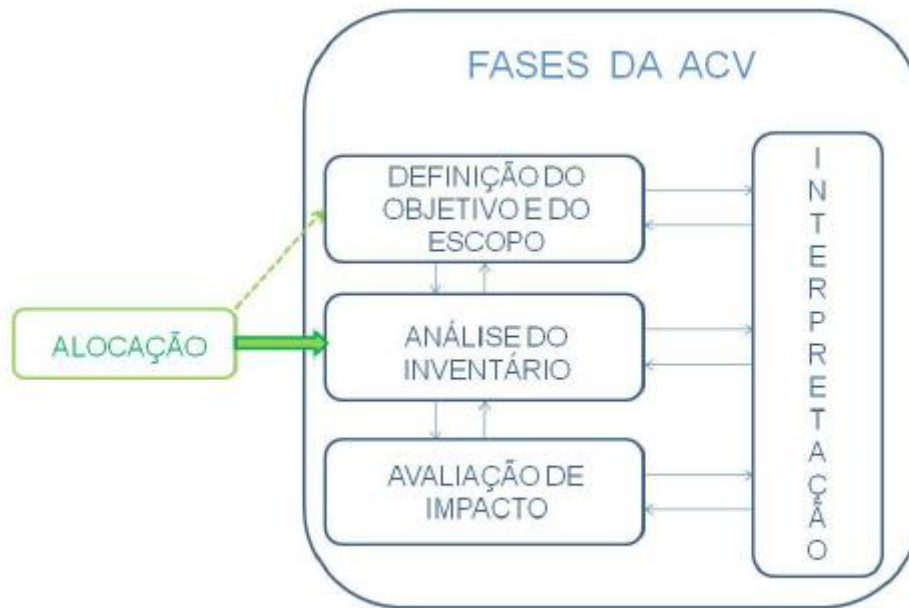
Representa o número de períodos (meses ou anos) para que o capital investido seja totalmente recuperado, obtendo lucro a partir daí. Dessa maneira, quanto menor seu valor, mais atrativo e menos arriscado é o projeto. Cadore e Giasson (2012) ressaltam ainda a necessidade de utilizá-lo em conjunto com outros indicadores, como a TIR e o VPL, por ele isoladamente não demonstrar o ganho monetário que será obtido com o projeto. Em seu cálculo, cuidados com a transferência dos valores para o tempo presente utilizando uma taxa de desconto, assim como possíveis alterações de sinais no fluxo de caixa devem ser levadas em consideração.

#### 4.6 Avaliação de ciclo de vida (ACV)

Com a crescente preocupação no que concerne a proteção ambiental, diversas metodologias foram desenvolvidas a fim de julgar os impactos ambientais gerados. Nesse sentido, a ACV é uma dessas ferramentas que busca avaliar e quantificar o potencial de impacto ambiental de produtos, processos ou serviços. Com isso, torna-se útil, principalmente, por auxiliar na tomada de decisão em projetos e identificar pontos de melhoria em processos (ISO, 2006). A técnica de ACV é dividida em quatro fases inter-relacionadas, conforme mostrado na *Figura 4.6*.

Na etapa de definição do objetivo e do escopo é estabelecido, entre outros fatores, o que se pretende com a ACV, a delimitação das fronteiras do sistema, procedimentos de alocação (seção 4.6.2), limitações do estudo, *software* a ser utilizado, entre outros. Além desses, é nessa fase onde se define a unidade funcional, a qual corresponde a uma unidade de referência para quantificar o desempenho do que está sendo estudado, por exemplo, 1 MJ de biocombustível produzido, 1 kWh de energia elétrica gerada, etc. (ISO, 2006).

A segunda fase é a de análise do inventário, ou seja, da coleta de dados de entrada e saída do sistema em estudo para que seja possível atingir os resultados pré-determinados na fase anterior. É nessa etapa que também ocorre o detalhamento do procedimento de alocação a ser utilizado (Ramírez, 2009).



**Figura 4.6:** Esquema resumido das fases de uma avaliação de ciclo de vida

Retirado de Ramírez (2009)

Já na etapa de avaliação de impacto busca-se compreender e avaliar o potencial de impacto ambiental e magnitude produzidos pelo produto, sistema ou processo em estudo. Ou seja, pretende-se entender a significância ambiental do resultado obtido. Por fim, tem-se a fase de interpretação, onde os resultados são sintetizados e discutidos a fim de garantir a conclusão da ACV de acordo com os objetivos definidos no escopo. Cabe salientar o caráter de retroalimentação que tal etapa proporciona, já que o processo como um todo é analisado, possibilitando ajustes e melhorias na ACV realizada (ISO, 2006).

A delimitação das fronteiras do sistema, realizada na fase de escopo, apresenta algumas alternativas comumente utilizadas em estudos de ACV. Venditti *et al.* (2013) relatam quatro principais:

- i. Berço ao portão (*cradle-to-gate*): Considera a partir da extração das matérias primas, mas não contabiliza o uso ou disposição final dos produtos.
- ii. Berço ao túmulo (*cradle-to-grave*): Considera a partir da extração das matérias primas até a disposição dos produtos finais.
- iii. Portão ao portão (*gate-to-gate*): Impacto considerado a partir da entrada das matérias primas no estabelecimento. Não considera uso ou disposição final dos produtos gerados.
- iv. Berço ao berço (*cradle-to-cradle*): Considera tudo, inclusive o potencial de reuso e reciclagem.

Deve-se salientar a importância dessa informação, já que, para efeitos de estudos que confrontem dois ou mais processos, a abordagem aplicável precisa ser a mesma para todos, a fim de garantir uniformidade e não distorção dos resultados (Venditti *et al.*, 2013).

#### 4.6.1 Categorias de impacto

A norma ISO 13065 que trata dos critérios de sustentabilidade para bioenergia traz uma lista com princípios, critérios e indicadores ambientais que devem ser levados em consideração nesse tipo de projeto. Sobre os princípios, destacam-se a redução de emissões de gases causadores do efeito estufa, conservação e proteção dos recursos hídricos, proteção da qualidade e produtividade do solo, promoção da boa qualidade do ar, promoção de impactos positivos e redução de negativos na biodiversidade, uso eficiente dos recursos energéticos e gerenciamento responsável de resíduos (ISO, 2015).

Atualmente, quando se trata de avaliação de impactos ambientais, a principal categoria considerada é o GWP, o qual tem relação com o princípio de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa. Além de ser mais facilmente visualizável, é também o que mais dispõe de dados na literatura para comparação com fontes produtivas convencionais, como a indústria petroquímica, por exemplo (Gilani, 2014). A categoria GWP, também denominada de mudança climática, visa contabilizar a emissão de gases causadores do aquecimento global, como dióxido de carbono, metano, óxido nitroso e gases fluorados. É quantificada em gramas de CO<sub>2</sub> equivalente (Palanov, 2014).

Obviamente, embora menos utilizadas e conhecidas, existem outras categorias de impacto que englobam os princípios dispostos na ISO 13065. A título de exemplos, pode-se citar (Palanov, 2014; da Silva *et al.*, 2015):

- i. Potencial de acidificação: Trata da geração de íons hidrogênio que são emitidos para a biosfera. Está relacionada ao fenômeno da chuva ácida, aumento de acidez dos solos, entre outros. É quantificada em gramas de SO<sub>2</sub> equivalente.
- ii. Ecotoxicidade aquática (ou terrestre): Contabiliza o aumento de agentes tóxicos na hidrosfera (ou litosfera) proveniente da disposição dos resíduos. Quantifica quanto um quilograma de agentes tóxicos polui, a um nível crítico, em termos de volume de água (ou massa de solo).
- iii. Potencial de eutrofização: Está relacionado a quantidade de nutrientes adicionada ao ecossistema, o que muitas vezes gera a proliferação de alguns organismos rapidamente, como as algas, prejudicando outros pela diminuição da concentração de oxigênio disponível. Compostos nitrogenados e fosfatados são os principais contribuintes. É quantificada em gramas de PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>equivalente.

- iv. Oxidação fotoquímica: Versa sobre a emissão de compostos orgânicos voláteis (VOCs), monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio para a atmosfera. Estão diretamente relacionados à formação dos nevoeiros de poluição (*smog*) nos grandes centros urbanos. É quantificada em gramas de etileno equivalente.

#### 4.6.2 Alocação

A alocação consiste na distribuição dos fluxos de entrada ou saída de um processo ou sistema de produto em estudo, entre o sistema de produto analisado e outros adicionais (ISO, 2006). A título de exemplificação, pode-se tratar de um processo que gere uma corrente de produto principal com outras de produtos secundários. Dessa maneira, é natural perceber que o impacto ambiental de todo processo em estudo não é de responsabilidade, unicamente, do produto principal, precisando ser repartido entre todos os produtos gerados (Ramírez, 2009).

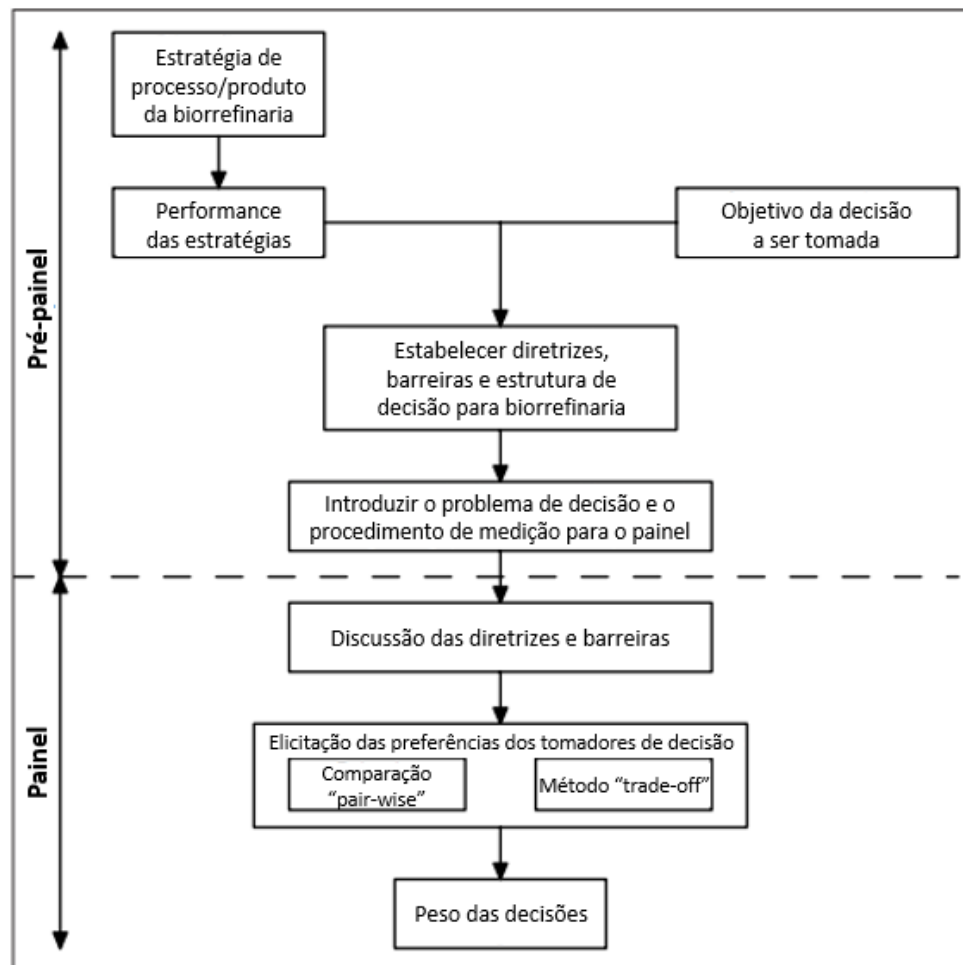
Segundo ISO (2006), sempre que possível, deve-se evitar o procedimento de alocação. A referida norma recomenda que seja realizada a divisão do processo multifuncional em vários subprocessos unifuncionais. Entretanto, tal metodologia pode não ser factível devido a interdependência de variações/efeitos entre as diferentes correntes do processo (Ramírez, 2009). Como opção sequencial, a ISO 14044 sugere a utilização do procedimento de expansão das fronteiras do sistema, no qual os produtos secundários são tratados como créditos por substituírem os já existentes no mercado (Pereira *et al.*, 2015).

Quando não for possível aplicar um dos dois procedimentos anteriores, a norma sugere que a alocação seja realizada de forma a refletir as relações físicas entre as correntes do processo, utilizando os fluxos mássicos ou energéticos, por exemplo. Por último, a ISO 14044 recomenda a alocação por outras relações, como pelo valor econômico das correntes. Cabe notar que, quando mais de um procedimento de alocação for aplicável, torna-se interessante realizar uma análise de sensibilidade a fim de demonstrar o impacto que as distintas abordagens geram no impacto ambiental calculado pela ACV (ISO, 2006).

#### 4.7 Tomada de decisão por múltiplos critérios (MCDM)

A MCDM é uma técnica que, com auxílio de um painel de especialistas, busca contabilizar critérios de diferentes categorias para direcionar investidores sobre as opções mais promissoras. Sendo assim, pretende-se garantir a sustentabilidade do projeto, já que parâmetros econômicos, ambientais e de competitividade são analisados conjuntamente. Na maioria das vezes tais critérios são conflitantes, sendo assim, é importante qualificar e quantificar a importância que cada um deles tem para o tomador de decisão, a fim de garantir que tais preferências sejam levadas

em consideração no momento de sua escolha (Stuart *et al.*, 2012). A *Figura 4.7* apresenta simplificada as etapas dessa técnica.



**Figura 4.7:** Esquema explicativo da técnica de MCDM

Adaptado de Janssen e Stuart (2010)

A etapa de pré-painel diz respeito a organização de informações entre as opções de investimento que serão comparadas, definição dos critérios a serem utilizados e dos especialistas que farão parte do painel. Já na etapa do painel, é introduzido o problema em questão aos membros, explica-se o objetivo do projeto em geral e os critérios que serão utilizados para avaliação (Janssen e Stuart, 2010). Existem diversos métodos para determinar a importância/peso de cada critério avaliado pelos tomadores de decisão, entretanto, dois se destacam por sua ampla utilização: *Analytical Hierarchy Process* - AHP e *Multi Attribute Utility Theory* - MAUT (Sanaei, 2014).

No método AHP uma escala qualitativa-quantitativa de importância comparativa é estipulada e, baseado nela, os critérios são confrontados em pares (*pair-wise*). O critério que recebe um valor mais alto tem maior relevância do que aquele com o qual está sendo confrontado. Após todas as comparações, com a soma dos valores atribuídos para cada critério, determina-se o peso de cada um deles para os tomadores de decisão (Janssen e Stuart, 2010; Sanaei, 2014).

Já no MAUT, define-se, por consenso, o critério mais importante, isso é, aquele que, do ponto de vista do painel, terá o maior peso na decisão. Em seguida, estabelece-se o valor *target* para esse parâmetro, ou seja, o valor que esse critério deveria ter para que houvesse investimento no projeto. Após isso são realizadas rodadas de *trade-off*, onde é avaliado quanto o painel está disposto a abrir mão do seu critério mais importante para que haja ganho em outro critério (do pior para o melhor valor desse critério entre as opções de escolha). Tal procedimento é realizado comparando o critério principal com todos os outros critérios presentes na tomada de decisão, de forma individual (um a um), obtendo-se ao final desse processo, o peso relativo de cada critério. Esse será utilizado para o cálculo de um *score de sustentabilidade*, sendo a opção que obtiver maior valor nessa pontuação a mais promissora para o investimento (Stuart *et al.*, 2012; Sanaei, 2014).

Apesar do AHP ser um método mais simples e de fácil aplicação, por estabelecer uma comparação semi-qualitativa e não considerar separadamente a importância de cada critério, acaba sendo objeto de questionamentos por alguns especialistas. Em contrapartida, embora mais complexo, o MAUT tem a capacidade de sanar essas deficiências com sua metodologia, tornando-se, portanto, mais rigoroso, confiável e preferível (Sanaei, 2014).

#### 4.8 Trabalhos existentes

Em relação aos estudos envolvendo a parte técnico-econômica existentes na literatura, Crawford (2013) avaliou a tecnologia para transformação de madeira do tipo folhosa em CA, utilizando uma rota cujo produto da fermentação é o ácido acético, convertido em acetato de etila que é transformado em etanol. O estudo comparou três formas de geração de hidrogênio necessário ao processo: reforma do gás natural, gaseificação da lignina e eletrólise da água, apontando a primeira como mais promissora economicamente. Ele destaca pontos como a necessidade de mitigação dos riscos econômicos e aumento de escala para tornar o produto competitivo.

Já Atsonios (2015) examinou duas rotas ATJ, por etanol e por ABE. Ambas forneceram preços de venda maiores que o de mercado, sendo a rota ABE ligeiramente melhor no aspecto econômico. Por fim, concluiu-se que o aproveitamento das correntes secundárias pode ser o ponto chave para tornar viáveis projetos de biorrefinarias. Diederichs (2015) comparou processos para produção de CA, utilizando material lignocelulósico 1G e 2G. Nenhuma das rotas estudadas resultou em preços atrativos, mas o uso dos resíduos 2G, pela não competição com alimentos e redução das emissões de CO<sub>2</sub>, é mais promissor.

Marrs e Spink (2015) estudaram uma biorrefinaria para produção de CA a partir de isobutanol. O projeto não se mostrou viável economicamente, mesmo reduzindo-se consideravelmente os custos fixo e operacional da planta. Pereira *et al.* (2017) avaliaram seis processos para produção de CA renovável a partir de biomassa. O HEFA mostrou-se como mais

promissor economicamente, enquanto a rota ATJ (etanol) foi uma das piores plataformas entre as analisadas, sequer atingindo uma VPL positiva. Klein *et al.* (2018) estudaram as plataformas HEFA, FT e ATJ (etanol e isobutanol) integradas a uma usina de etanol brasileira. Em termos econômicos, a alternativa FT mostrou-se mais promissora, enquanto a ATJ teve o pior desempenho.

Anheden *et al.* (2017) estudaram a possibilidade de utilização da lignina kraft para geração de um bio-óleo a ser utilizado como CA. O projeto não se mostrou viável economicamente, resultando num custo operacional para produção do bio-óleo precursor três vezes maior do que o óleo cru. A melhoria nas etapas de processamento e nos rendimentos das operações, assim como a produção de outros compostos químicos de alto valor agregado são medidas necessárias para viabilizar essa plataforma tecnológica.

Já Yao *et al.* (2017) realizaram uma análise estocástica com três tipos de biomassa vegetal, produzindo etanol e convertendo-o em CA. As alternativas não se mostraram promissoras economicamente, entretanto, concluiu-se que a incerteza técnica na rota de produção do CA por álcool (ATJ) é um ponto crítico do projeto. A *Tabela 4.1* apresenta alguns resultados quantitativos de estudos técnico-econômicos para produção de CA já realizados.

**Tabela 4.1:** Avaliações técnico-econômicas para produção de CA renovável

Biomassa	Rota	Conclusões	Referência
Populus ( <i>Hybrid poplar</i> )	Ácido diluído ATJ (etanol)	1,85 – 1,09 US\$/l (TIR = 15% e 95 – 380 km <sup>3</sup> /ano)	Crawford (2013)
Cana-de-açúcar Milho <i>Switchgrass</i>	<i>Advanced Fermentation</i> ATJ (etanol)	1,56 / 1,75 / 2,30 US\$/l (TIR = 15%)	Staples <i>et al.</i> (2014)
Palha de milho (2000 t/dia)	Ácido diluído ATJ (etanol)	1,02 US\$/l (TIR = 10%)	Atsonios (2015)
Palha de trigo (2000 t/dia)	Ácido diluído ATJ (ABE)	0,99 US\$/l (TIR = 10%)	Atsonios (2015)
Cana-de-açúcar (2670 t/dia)	ATJ (etanol)	1,34 US\$/l (TIR: -12,8 +16,0%)	Diederichs (2015)
Lignina kraft	LTJ (Lignoboost)	Produção do bio-óleo: 26 €/GJ (Óleo cru: 8 €/GJ)	Anheden <i>et al.</i> (2017)
Cana-de-açúcar Milho	Usina integrada ATJ (etanol)	VPL < 0 (0,67 US\$/l)	Pereira <i>et al.</i> (2017)

Média do preço CA fóssil no Brasil (2003 - 2014): 0,43 US\$/l (ANP, 2017)

Sob o ponto de vista dos impactos ambientais, Elgowainy *et al.* (2012) compararam diversas plataformas de produção de CA, sendo que uma redução entre 55-85% na pegada de carbono foi atingida, comparada ao CA fóssil, para alternativas que utilizavam a gaseificação de biomassa e o hidrocessamento de óleos vegetais. Fan *et al.* (2013) mostraram que pode haver até



mesmo captura de CO<sub>2</sub> na produção de CA renovável a partir do hidrocessamento da planta da espécie *Thlaspi arvense*.

Fortier *et al.* (2014) estudaram o impacto nas emissões de gases causadores do efeito estufa, sobre a produção de CA a partir do tratamento termoquímico de microalgas. Concluiu-se que é possível reduzir em até 76% tais emissões quando comparado ao combustível de origem fóssil. Já Budsberg *et al.* (2016) complementaram o estudo realizado por Crawford (2013), comprovando, para a rota ATJ, uma diminuição do potencial de emissões que contribuem para o aquecimento global em relação ao convencional. A etapa de geração de hidrogênio tem impacto considerável no ciclo de vida do projeto, sendo o uso de gás natural o fator determinante para essa ocorrência.

Crossin (2017) afirmou que, com a produção de CA a partir do eucalipto tipo *mallee*, é possível atingir uma redução de 40% nas emissões de CO<sub>2</sub> frente ao de petróleo. Já de Jong *et al.* (2017) avaliaram os processos FT, liquefação hidrotérmica e ATJ, obtendo, respectivamente, reduções no GWP entre 86-104%, 77-80% e 71-75% quando comparado ao CA fóssil. Klein *et al.* (2018) estudaram as plataformas HEFA, FT e ATJ (etanol e isobutanol) integradas a uma usina de etanol brasileira. Para todas elas, reduções maiores que 70% no GWP foram obtidas, quando comparadas ao de origem fóssil. A Tabela 4.2 sintetiza alguns resultados quantitativos de avaliações de ciclo de vida na produção de CA renovável.

**Tabela 4.2:** Avaliações de ciclo de vida para produção de CA renovável

Biomassa	Rota	Conclusões	Referência
<i>Switchgrass</i> Microalga	FT Liquefação hidrotérmica	17,7 e 50,7 g CO <sub>2</sub> eq./MJ	Stratton <i>et al.</i> (2010)
Populus ( <i>Hybrid poplar</i> )	Ácido diluído ATJ (etanol)	66,0 g CO <sub>2</sub> eq./MJ	Budsberg <i>et al.</i> (2013)
<i>Thlaspi arvense</i>	Liquefação hidrotérmica	44,9 g CO <sub>2</sub> eq./MJ	Fan <i>et al.</i> (2013)
Cana-de-açúcar Milho <i>Switchgrass</i>	<i>Advanced</i> <i>Fermentation</i> ATJ (etanol)	12,7 / 62,6 / 37,4 g CO <sub>2</sub> eq./MJ	Staples <i>et al.</i> (2014)
Eucalipto ( <i>mallee</i> )	Pirólise rápida	43,6 g CO <sub>2</sub> eq./MJ	Crossin (2017)
Cana de açúcar	ATJ (etanol)	Redução de 71-75% na pegada de carbono (comparado ao CA fóssil)	de Jong <i>et al.</i> (2017)
GWP do CA fóssil: 87,5 g CO <sub>2</sub> eq./MJ de CA (Staples <i>et al.</i> , 2014)			

Fica evidente que já existem estudos sobre avaliação técnico-econômica e de ciclo de vida para produção de CA a partir de diferentes tipos de biomassa. Entretanto, ainda não há projetos que tratem da produção desse combustível renovável em biorrefinarias que estejam integradas,

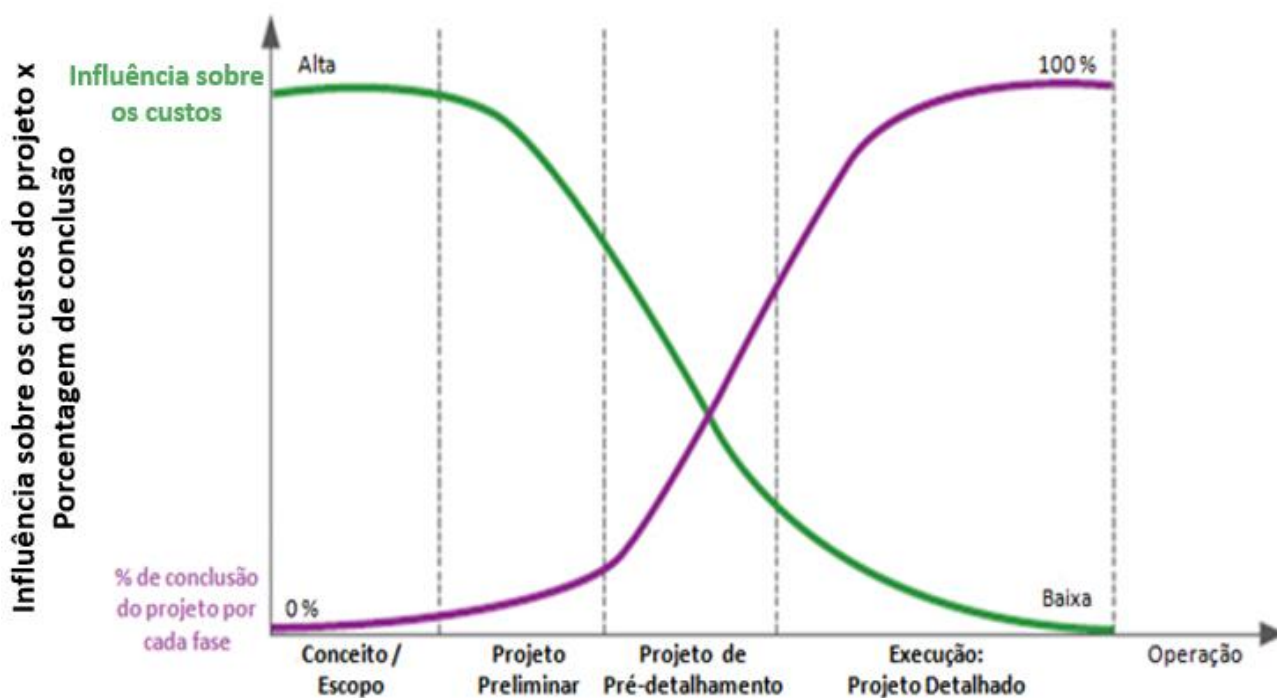
energeticamente, pela disponibilidade de vapor e pelo compartilhamento de matéria-prima, com usinas kraft de celulose de eucalipto. Além disso, são escassas as avaliações técnico-econômicas que contemplam estratégias para mitigação de riscos desse tipo de projeto. Cabe destacar também que não foram encontrados estudos que aplicam a metodologia para tomada de decisão por múltiplos critérios na produção de CA renovável. Portanto, esse trabalho tem o intuito de preencher essas lacunas de conhecimento existentes, proporcionando mais alternativas de processos nessa área de pesquisa.

## 5 Metodologia

A análise técnico-econômica foi aplicada ao “Estágio Conceitual” (ou “Escopo”) do projeto, no qual, embora exista incertezas associadas aos dados de entrada e resultados, as estimativas de custos das opções são comparáveis e suficientes para uma tomada de decisão de fase inicial de projeto (Hytönen *et al.*, 2013). Ademais, as decisões tomadas nessa fase possuem elevado impacto sobre os custos do projeto e, conseqüentemente, sobre as chances de sucesso, como mostrado na *Figura 5.1*.

Essas são estimativas por ordem de magnitude e as opções de rotas são avaliadas pelo método onde as principais etapas do processo são tratadas como blocos. Ou seja, há um detalhamento mínimo e é necessário conhecer os fluxos de entrada, saída e consumos mais relevantes de cada etapa. Dessa maneira, para obter os dados de cada um desses blocos, utilizaram-se estudos da literatura já realizados com base em diagramas de fluxo de processo (PFDs) e que contemplam as avaliações técnico-econômicas necessárias para cada uma das três rotas.

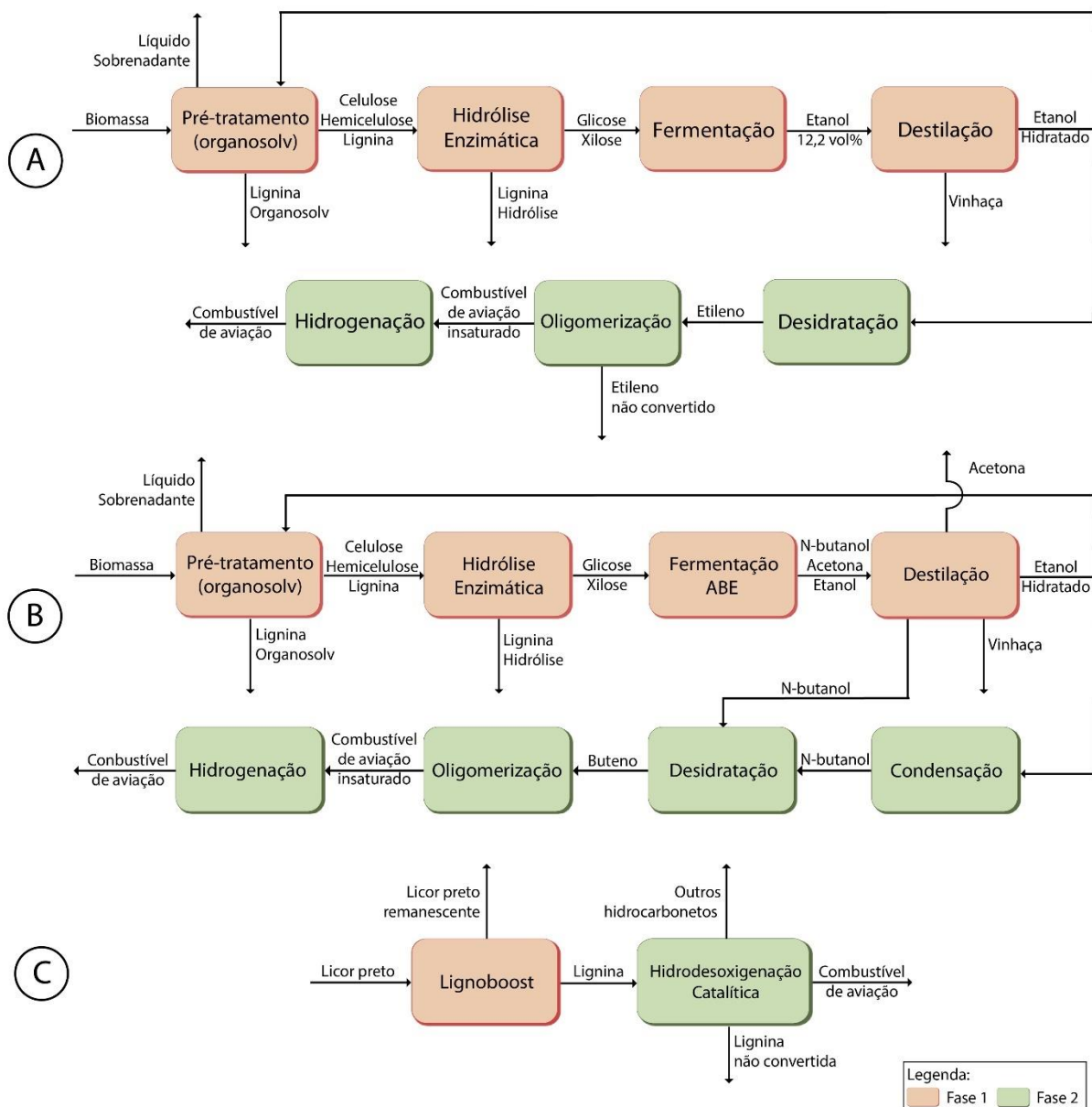
Os cálculos relacionados à integração das opções de biorrefinarias com a fábrica de celulose já existente e à avaliação econômica (CAPEX, OPEX, taxa interna de retorno e outros indicadores) foram realizados em planilhas do software Microsoft Excel® 2016. Cabe salientar que os balanços de massa e energia para uma usina kraft de celulose foram desenvolvidos pelo grupo de pesquisa do Prof. Dr. Adriano Pinto Mariano, docente da Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP, sendo tais dados validados com uma empresa do setor.



**Figura 5.1:** Influência das diversas etapas do ciclo de vida sob os custos do projeto

Adaptado de Ernst & Young (2016)

Certamente uma empresa de celulose que deseja investir na produção de CA terá que identificar os riscos e incertezas que permeiam esse tipo de projeto. Assim, optou-se pela elaboração de uma análise técnico-econômica mais aprofundada do que a tradicional, isso é, que esteja interligada a todas os riscos que foram reconhecidos. Para isso, definiram-se estratégias de implantação do projeto em fases, ou seja, a construção das biorrefinarias por etapas. Isso mitiga os riscos levantados e aumenta as chances de sucesso do projeto, facilitando assim a tomada de decisão para os investidores. A *Figura 5.2* apresenta as três opções de rotas estudadas: A, B e C, evidenciando as estratégias de implementação adotadas.



**Figura 5.2:** Fluxogramas das Rotas A, B e C avaliadas para produção de CA

Tal faseamento permite que uma tecnologia atualmente em desenvolvimento seja implantada só daqui alguns anos, onde estará mais aperfeiçoada. Ou, que um produto sem valor de mercado atualmente, seja utilizado na própria planta kraft num primeiro momento e, após alguns anos, destinado a consumidores externos (Sanaei, 2014). É o que ocorre, por exemplo, com as plataformas de conversão ATJ e LTJ, as quais não estão completamente desenvolvidas e, portanto, não poderiam ser implantadas hoje (Mawhood *et al.*, 2014).

## 5.1 Descrição do processo

### 5.1.1 Rotas A (etanol) e B (ABE)

Madeira de eucalipto com 50% de umidade e composição mássica de 45,5% celulose, 20,3% hemicelulose, 29,7% lignina e 4,5% de extrativos é alimentada na unidade de pré-tratamento organosolv, sendo que 3% da quantidade total alimentada é “perdida” e encaminhada para queima numa caldeira auxiliar. Mistura água/etanol 1:1 em massa (4 t/t biomassa úmida) é adicionada, sendo o etanol direcionado a um sistema de recuperação, onde 99,5% são reciclados ao pré-tratamento (Mesa *et al.*, 2016). São três as correntes resultantes dessa etapa: a primeira é a que será encaminhada para etapa de hidrólise enzimática, contendo 100% da celulose, 28,8% da hemicelulose e 33,6% da lignina iniciais. A segunda é denominada lignina organosolv, que possui 5% de umidade e é composta por 59,8% da quantidade de lignina contida na biomassa. Por fim, tem-se a corrente de líquido sobrenadante, bastante diluída, que carrega o restante de hemicelulose e lignina, além dos extrativos (Nitzsche *et al.*, 2016).

Na etapa de hidrólise enzimática, enzima celulase é adicionada na razão de 0,0059 g/g celulose enquanto água é acrescentada na razão 4 t/t fibras totais alimentadas nessa etapa, resultando numa carga de sólidos na en 20%. Celulose e hemicelulose são convertidas em glicose e xilose, sendo esses os açúcares que seguem para a etapa de fermentação. O restante dos compostos presentes compõe a corrente de lignina hidrólise, cujo teor de umidade é de 50% (Nitzsche *et al.*, 2016). As conversões relacionadas as Rotas A e B são mostradas na *Tabela 5.1*, cuja diferenciação ocorre a partir da etapa de fermentação.

Nessa etapa, são emitidas 0,96 t de CO<sub>2</sub>/t etanol produzido na Rota A (Nitzsche *et al.*, 2016). Em relação a Rota B, gases são gerados na razão mássica 1,7:1 por quantidade de mistura ABE produzida, sendo 97% CO<sub>2</sub> e 3% H<sub>2</sub> (Zverlov *et al.*, 2006). O etanol destilado é primeiramente destinado ao reciclo como *make up* de solvente. Para o caso da Rota B, a etapa de condensação só é construída caso haja sobra de etanol. Na etapa ATJ, faz-se necessária a adição de 0,04 kg de H<sub>2</sub>/l CA, sendo esse hidrogênio produzido a partir da planta de reforma de gás natural, que gera 0,347 kg de H<sub>2</sub>/kg de gás natural, a ser construída junto à biorrefinaria *retrofit* (Crawford, 2013).

**Tabela 5.1:** Conversões das principais etapas das Rotas A e B

Processo	Conversão (%)	Referência
Celulose para hexoses	77,4	Nitzsche <i>et al.</i> (2016)
Hemicelulose para pentoses	26,4	Nitzsche <i>et al.</i> (2016)
Rota A <sup>a</sup>		
Açúcares para etanol	51,1	Crawford (2013)
Etanol para etileno	58	Crawford (2013)
Etileno para CA	96	Crawford (2013)
Rota B <sup>b</sup>		
Hexoses para n-butanol	19 / 28,5	Mariano <i>et al.</i> (2013)
Hexoses para acetona	9,5 / 7,6	Mariano <i>et al.</i> (2013)
Hexoses para etanol	1,9 / 1	Mariano <i>et al.</i> (2013)
Pentoses para n-butanol	16 / 27	Mariano <i>et al.</i> (2013)
Pentoses para acetona	8 / 7,2	Mariano <i>et al.</i> (2013)
Pentoses para etanol	1,6 / 0,9	Mariano <i>et al.</i> (2013)
Etanol para n-butanol	27,1	Atsonios (2015)
N-butanol para buteno	75,7	Atsonios (2015)
Buteno para CA	100	Atsonios (2015)

<sup>a</sup>Microrganismo fermentativo utilizado na Rota A é GMO, sendo capaz de converter tanto os açúcares C6 como C5

<sup>b</sup>O primeiro valor representa a utilização do microrganismo normal, o segundo, do GMO

A Tabela 5.2 apresenta os consumos de energia elétrica e vapor de cada uma das unidades constituintes das Rotas A e B. Os vapores de baixa e média pressão consumidos no processo estão a temperaturas de 160 e 192°C e pressões de 5,3 e 13 bar, respectivamente. Especificamente para Rota B, o consumo de vapor e quantidade de vinhaça produzida na destilação foram tomados de acordo com os resultados obtidos por Mariano e Maciel Filho (2012), como mostrado nas Equações 5.1 e 5.2, onde  $C_{n-butanol}$  representa a concentração desse produto.

$$\text{Consumo vapor baixa pressão [GJ/t n - butanol]} = 111,22 \cdot C_{n-butanol}^{-0,592} \quad \text{Equação 5.1}$$

$$\text{Produção vinhaça [l/l n - butanol]} = 631,39 \cdot C_{n-butanol}^{-0,858} \quad \text{Equação 5.2}$$

A estratégia de implantação foi dividida em duas fases, com a primeira delas contemplando a construção da planta até a produção de etanol hidratado/mistura ABE. Já na segunda etapa a planta ATJ será construída. As correntes de líquido sobrenadante e vinhaça são enviadas para a unidade de tratamento de efluentes da usina kraft. A corrente de lignina hidrólise é encaminhada para queima numa caldeira auxiliar a ser adquirida no projeto. Em relação a lignina

organosolv, durante a Fase 1 ela também é encaminhada para queima na caldeira auxiliar a fim de gerar vapor e energia elétrica, enquanto na Fase 2 ela passa a ser comercializada a 520 US\$/t (Nitzsche *et al.*, 2016). A acetona produzida na Rota B não é convertida em CA, sendo comercializada separadamente em ambas as fases. O etileno não convertido na Rota A também é comercializado.

**Tabela 5.2:** Consumos de vapor e energia elétrica das Rotas A, B (Normal) e B (GMO)

Unidade	Rota A	Rota B	Referência
Pré-tratamento	EE <sup>a</sup> : 164 kWh/t biomassa seca VB <sup>b</sup> : 156 kWh/t biomassa seca VM <sup>c</sup> : 346 kWh/t biomassa seca		Nitzsche <i>et al.</i> (2016)
Hidrólise enzimática	EE: 45 kWh/t celulose		Nitzsche <i>et al.</i> (2016)
Fermentação	EE: 11,2 kWh/t açúcares	VB: Equação 4.1	Nitzsche <i>et al.</i> (2016)
Destilação	VB: 1165 kWh/t etanol		Mariano e Maciel Filho (2012)
ATJ	EE: 0,136 kWh/l CA VB*: 1,425 kWh/l CA		Crawford (2013)

<sup>a</sup>EE: Energia elétrica | <sup>b</sup>VB: Vapor de baixa pressão | <sup>c</sup>VM: Vapor de média pressão

\*Caso a etapa de condensação seja necessária na Rota B, adiciona-se 1,1 kWh/l CA a esse valor

### 5.1.2 Rota C (lignina)

Lignina é extraída da corrente de licor preto proveniente da usina kraft que alimenta a etapa Lignoboost, a qual apresenta 70% de eficiência de extração. São adicionados CO<sub>2</sub> e ácido sulfúrico nas razões de 0,31 e 0,20 t/t de lignina extraída, respectivamente. Além disso, há o consumo de 82 kWh e duas toneladas de água de lavagem para cada tonelada dessa mesma base de referência (Fornell e Berntsson, 2009; Tomani *et al.*, 2011). O produto resultante apresenta cerca de 95% de teor de sólidos (Domtar, 2013).

Já a etapa de hidrodessoxigenação catalítica, capaz de transformar a lignina em CA, apresenta 81,03% de conversão do polímero, sendo o rendimento no combustível desejado apenas de 21,83% (Wang *et al.*, 2015). Consome-se 1,1 de vapor de baixa pressão e 0,1 kWh/l CA produzido (Crawford, 2013).

A quantidade de lignina extraída deve ser, no máximo, de 25% da quantidade disponível na corrente de licor preto da usina kraft, já que valores maiores causariam prejuízo de funcionamento à caldeira de recuperação (informação do fabricante da tecnologia Lignoboost). Na Fase 1 do projeto é instalada a planta Lignoboost, onde a lignina extraída é alimentada em uma caldeira auxiliar para queima a fim de gerar energia elétrica. Já na Fase 2 é construída a unidade LTJ.

Como haverá sobra de capacidade na caldeira de recuperação devido a lignina extraída, há a possibilidade de aumento da produção de polpa celulósica da usina kraft, visto ser tal caldeira o

principal gargalo desse processo produtivo. Considerou-se que o aumento na produção de polpa pode ser, no máximo, de 10% em relação a produção original da usina kraft para que não ocorram problemas operacionais na linha de fibras. Ou seja, são utilizados dois critérios restritivos para definir o aumento: o primeiro é o atingimento da capacidade máxima da caldeira de recuperação, já o segundo o aumento de 10% na produção de polpa celulósica.

A água de lavagem utilizada no Lignoboost será enviada para a unidade de tratamento de efluentes enquanto a corrente de licor preto remanescente do processo sempre é enviada para caldeira de recuperação da planta kraft. Lignina não convertida e outros hidrocarbonetos produzidos na segunda etapa do projeto são enviados para queima na caldeira auxiliar.

## 5.2 Avaliação técnico-econômica

As principais considerações adotadas para a avaliação técnico-econômica são mostradas na *Tabela 5.3*.

**Tabela 5.3:** Principais considerações adotadas para a análise técnico-econômica

Parâmetro	Assunção
Período de produção (anos)	25
Tempo de construção (anos)	1
Implantação da Fase 1 (ano)	0°
Implantação da Fase 2 (ano)	5°
Fator de operação (dias/ano)	354
Cronograma de produção	100% da capacidade nominal no primeiro ano de produção
Estrutura de financiamento do projeto	Nenhuma dívida (100% de capital próprio)
Valor de sucata	Nenhum
Taxa de desconto	8%
Imposto de renda	34%
Modelo de depreciação	Linear
Correção da capacidade	Regra 0,6
Correção da inflação	CEPCI 2016
Taxa de câmbio	BR\$ 3,50 = US\$ 1,00
Fator de Lang <sup>a</sup>	3
Capital de giro	5% do CAPEX
Manutenção	2% do CAPEX
Mão de obra	1% do CAPEX

<sup>a</sup>Por se tratar de biorrefinaria retrofit

Para a avaliação técnico-econômica foi considerada uma planta kraft brasileira moderna operando 354 dias/ano, com produção de polpa celulósica de 1,2 milhões de adt (*air dry ton*) por



ano (dados validados com uma empresa do setor). Há compartilhamento de energia elétrica, vapor, matéria-prima e a unidade de tratamento de efluentes com as biorrefinarias. A usina possui sobras de 19,4 MW de energia elétrica e 113 t/h de vapor, além de uma unidade de tratamento de efluentes que processa 3397 m<sup>3</sup>/h. Assumiu-se que haverá um custo de capital para compra de uma caldeira auxiliar e de uma turbina à vapor devido ao vapor gerado pela queima das correntes secundárias. Assim como para a expansão do pátio de madeira e da unidade de tratamento de efluentes devido as maiores demandas após a instalação da biorrefinaria. A *Figura 5.3* mostra simplificada a planta kraft utilizada, evidenciando as principais correntes a serem incorporadas às biorrefinarias.

O desempenho das rotas foi avaliado pelo preço mínimo de venda do CA para que determinada TIR fosse atingida (valor esse definido no início da seção 6). As escalas das biorrefinarias foram variadas entre: a) 500 e 2000 t/dia de biomassa seca para as Rotas A e B e b) 50 e 155 kt/ano de lignina extraída do licor preto para a Rota C (8 – 25% da quantidade originalmente presente nessa corrente). A *Tabela 5.4* apresenta os valores adotados para os custos operacionais e receitas dos projetos.

**Tabela 5.4:** OPEX e receitas consideradas na avaliação técnico-econômica

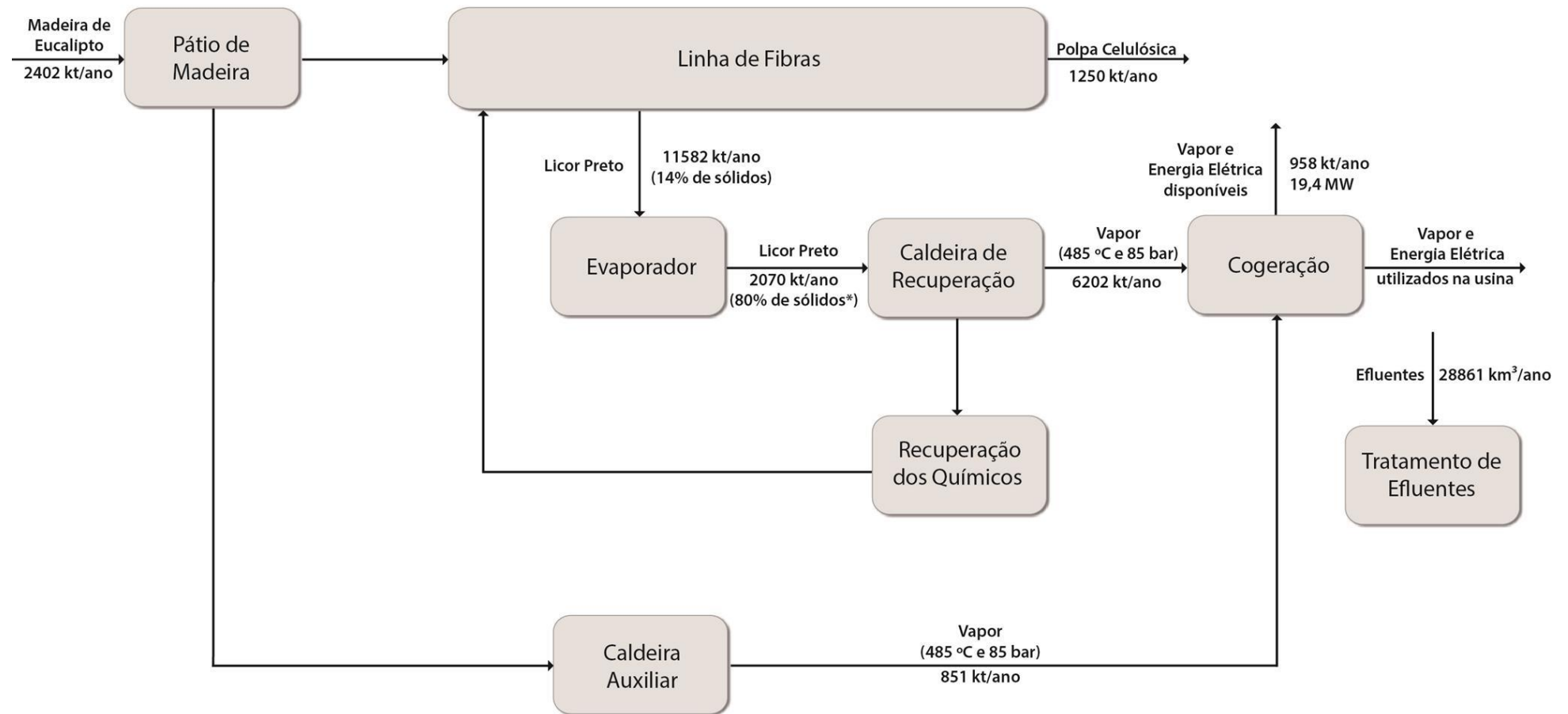
OPEX/Receitas	Valor	Unidade	Referência
Biomassa <sup>a*</sup>	0,0036.M + 62,1	US\$/t	Info. de especialista
Energia elétrica	58,22	US\$/MWh	Pereira <i>et al.</i> (2015)
Enzima	5,0	US\$/kg	Tao <i>et al.</i> (2013)
Levedura	20,0	US\$/t	Info. de especialista
Microorganismo (GMO)	0,016	US\$/l n-butanol	Mariano <i>et al.</i> (2013)
Gás natural	0,36	US\$/kg	Info. de especialista
Etanol hidratado <sup>b</sup>	0,4879	US\$/l	CEPEA/ESALQ (2016)
N-butanol <sup>c</sup>	1,21	US\$/kg	AliceWeb/MDIC (2016)
Acetona <sup>c</sup>	1,05	US\$/kg	AliceWeb/MDIC (2016)
Etileno	1,28	US\$/kg	Pereira <i>et al.</i> (2017)
Ácido sulfúrico	52,1	US\$/t	Fornell e Berntsson (2009)
CO <sub>2</sub>	23,3	US\$/t lignina extraída	Fornell e Berntsson (2009)
OPEX polpa adicional	68,6	US\$/adt polpa	Info. de especialista
Polpa celulósica	730,0	US\$/adt polpa	Info. de especialista
Catalisadores	0,08	US\$/l CA	Crawford (2013)
Tratamento de efluentes	0,2	US\$/t	Info. de especialista

<sup>a</sup>M = t/dia de biomassa seca processada.

<sup>b</sup>Média das safras 2013 - 2016

<sup>c</sup>Média das importações brasileiras entre 2013 - 2015

\*A função linear para o custo da madeira de eucalipto adicional utilizada na biorrefinaria considera o custo adicional do transporte resultante do aumento do raio médio da colheita e o aumento do preço da madeira pela maior demanda.



**Figura 5.3:** Principais correntes da usina kraft utilizada para o acoplamento com as biorrefinarias

\*Sendo a lignina 37,5% desses sólidos

Já a *Tabela 5.5* sintetiza os produtos de cada uma das rotas de acordo com a estratégia de faseamento adotada.

**Tabela 5.5:** Utilização dos produtos de acordo com o faseamento adotado para as três rotas

	Fase 1	Fase 2
Rota A (etanol)	Etanol	Combustível de aviação
	Lignina organosolv (queima)	Etileno Lignina organosolv (520 US\$/t)
Rota B (ABE)	N-butanol	Combustível de aviação
	Acetona	Acetona
	Lignina organosolv (queima)	Lignina organosolv (520 US\$/t)
Rota C (lignina)	$\leq 10\%$ Polpa celulósica	$\leq 10\%$ Polpa celulósica
	Lignina kraft (queima)	Combustível de aviação

Além disso, uma análise de sensibilidade foi realizada para verificar o impacto de parâmetros técnicos e econômicos na lucratividade dos projetos. Assim como uma análise de risco pela simulação Monte Carlo.

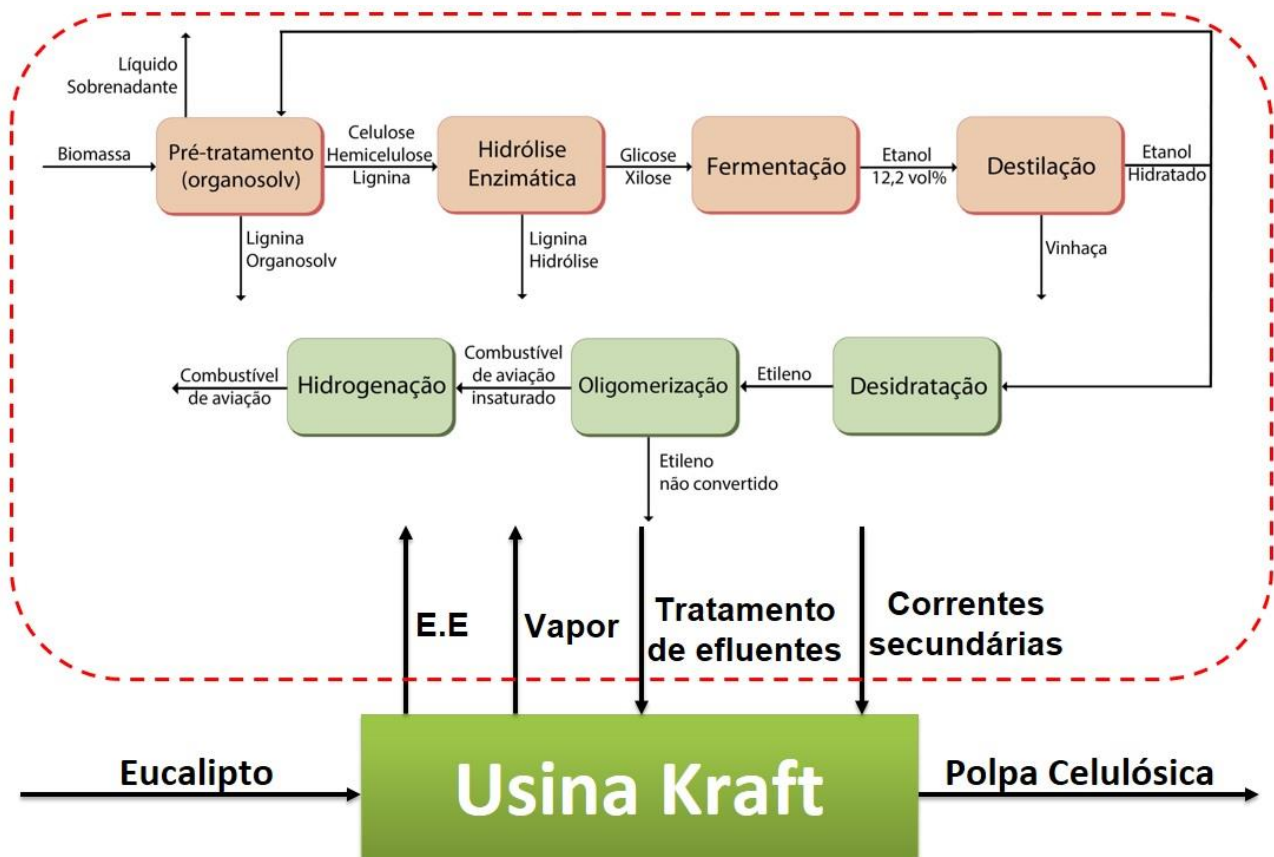
### 5.3 Avaliação de ciclo de vida (ACV)

Para a ACV foi utilizada a abordagem do berço ao túmulo (*cradle-to-grave*). As fronteiras do sistema foram restritas a biorrefinaria, não contabilizando a usina kraft existente, conforme ilustrado na *Figura 5.4*. A unidade funcional considerada foi de 1 MJ de CA produzido. Foi empregado o software *OpenLCA v.1.5.0* com a base de dados *Ecoinvent 3.3*. Em relação a categoria de impacto, optou-se apenas pelo potencial de aquecimento global (GWP 100a), quantificado em termos de CO<sub>2</sub> equivalente. Para isso o método de avaliação de impacto *IPCC 2013* foi escolhido.

O impacto da enzima foi contabilizado segundo o resultado fornecido por Liptow *et al.* (2013), isso é, 9000 g CO<sub>2</sub> eq./kg enzima. Considerou-se que a enzima era produzida na empresa *Novozymes*, localizada no município de Araucária – PR e transportada até a planta kraft situada na cidade de Três Lagoas – MS (800 km de distância). Todos os outros fluxos de entrada, saída e processos foram utilizados da base de dados adotada, destacando-se:

- i. Madeira de eucalipto: wood chips production, hardwood, at sawmill | wood chips, wet, measured as dry mass | - RoW.
- ii. Energia elétrica retirada da usina kraft: linerboard production, kraftliner | electricity, medium voltage | RoW.

- iii. Etanol para *make up* do pré-tratamento: ethanol production from sugarcane | ethanol, without water, in 95% solution state, from fermentation | BR.
- iv. Efluentes: treatment of wastewater, unpolluted, capacity 5E9l/year | wastewater, unpolluted | RoW.
- v. Transporte: transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 | transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 | RoW.



**Figura 5.4:** Delimitação das fronteiras do sistema para a ACV

(a extração das matérias-primas para biorrefinaria e a interface com a usina kraft estão inclusas)

As emissões de CO<sub>2</sub> provenientes das etapas de fermentação, uso do CA renovável e da queima das fibras não convertidas na caldeira auxiliar foram consideradas biogênicas. Ou seja, o que foi emitido para a atmosfera é assimilado como biomassa durante o ciclo de crescimento do eucalipto. Desse modo elas não contribuem para o potencial de aquecimento global (Pereira *et al.*, 2015). Admitiu-se que o CA produzido é transportado até a refinaria de Paulínia – SP (REPLAN), percorrendo 650 km e, após isso, encaminhado para os aeroportos de São Paulo – SP (200 km de distância).

Devido ao fato de co-produtos serem gerados pelas biorrefinarias estudadas, quatro métodos de alocação distintos foram analisados, a fim de contabilizá-los:

- i. Substituição (*Displacement*): Todos os co-produtos gerados são contabilizados como créditos, substituindo os compostos convencionais presentes no mercado.
  - a. Energia elétrica gerada: Creditado como o impacto da matriz energética brasileira.
  - b. Lignina organosolv: Substituta do fenol para produção de resinas fenólicas, de acordo com a conversão de 92,58% e rendimento de 6,02% desse tipo de lignina em compostos fenólicos (Wanmolee *et al.*, 2016).
  - c. Etanol reciclado: Substituto do etanol hidratado produzido a partir da cana-de-açúcar no Brasil (mesmo utilizado para contabilizar o impacto do *make up*).
  - d. Acetona: Substituta da acetona convencional da indústria química.
  - e. Etileno: Substituto do etileno derivado de petróleo.
- ii. Alocação mássica: Particiona o impacto proporcionalmente aos fluxos mássicos dos produtos vendidos. Energia elétrica gerada e o etanol reciclado continuam sendo contabilizados como créditos.
- iii. Alocação energética: Impacto correspondente ao fluxo energético dos produtos baseado no poder calorífico inferior. Os valores adotados foram de 44,1, 26,0, 29,6 e 47,5 GJ/t para CA, lignina organosolv, acetona e etileno, respectivamente (GREET, 2010; Coelho, 2012; Elgowainy *et al.*, 2012; Phyllis2, 2017).
- iv. Alocação econômica: As receitas obtidas pelos produtos vendidos dividem o impacto total de forma proporcional. Os valores utilizados para a acetona e etileno são mostrados na *Tabela 5.4*. Para lignina organosolv foi assumido o preço de 520 US\$/t (Nitzsche *et al.*, 2016). Já para o CA foi utilizado o preço mínimo de venda calculado para cada uma das rotas.

Em relação a energia elétrica gerada, além do crédito referente ao impacto da matriz energética brasileira, foram avaliadas outras duas formas de substituição. A primeira delas considerando o impacto gerado pela produção hidroelétrica brasileira (menor abatimento). Já o segundo pela eletricidade proveniente da queima de gás natural (maior abatimento).

#### 5.4 Tomada de decisão por múltiplos critérios (MCDM)

Para o MCDM foi utilizado o método MAUT, cujo *score de sustentabilidade* (U) é calculado pela *Equação 5.3*, sendo composto por duas parcelas. A primeira,  $u_i$ , é o valor utilidade, caracterizado por ser um número entre 0 e 1 que normaliza os critérios de escolha. Pode ser do tipo “maior melhor”, a exemplo da TIR, onde o maior valor entre as opções desse critério corresponde a

1, o pior valor à 0, e os valores intermediários são obtidos mediante interpolação linear. Também há o tipo “menor melhor”, como o CAPEX, que segue a lógica inversa (Sanaei, 2014).

$$U = \sum u_i \cdot w_i \quad \text{Equação 5.3}$$

Já a segunda parcela ( $w_i$ ) é o peso relativo de cada critério, obtido por meio das rodadas de *trade-off* realizadas com o painel. Por meio de uma operação matricial, conforme mostrado na *Equação 5.4*, obtém-se o peso de cada critério, sendo  $w_1$  o do critério mais importante,  $w_2$  relativo ao critério adotado para o primeiro *trade-off* e assim sucessivamente. Os valores  $u_2, \dots, u_N$  mostrados na primeira matriz representam os valores utilidade remanescentes do critério mais importante após o painel ter aberto mão dele por outro critério durante o *trade-off* (Sanaei, 2014).

$$\begin{bmatrix} 1 - u_2 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 - u_N & 0 & \dots & -1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Equação 5.4}$$

Para avaliar as rotas de produção de CA desse trabalho e definir a mais promissora, uma análise Monte Carlo foi simulada tentando prever a escolha de um painel de especialistas real. Mais detalhes de como foi realizado esse procedimento são mostrados na apresentação dos resultados.

## 6 Resultados e Discussão

### 6.1 Avaliação técnico-econômica

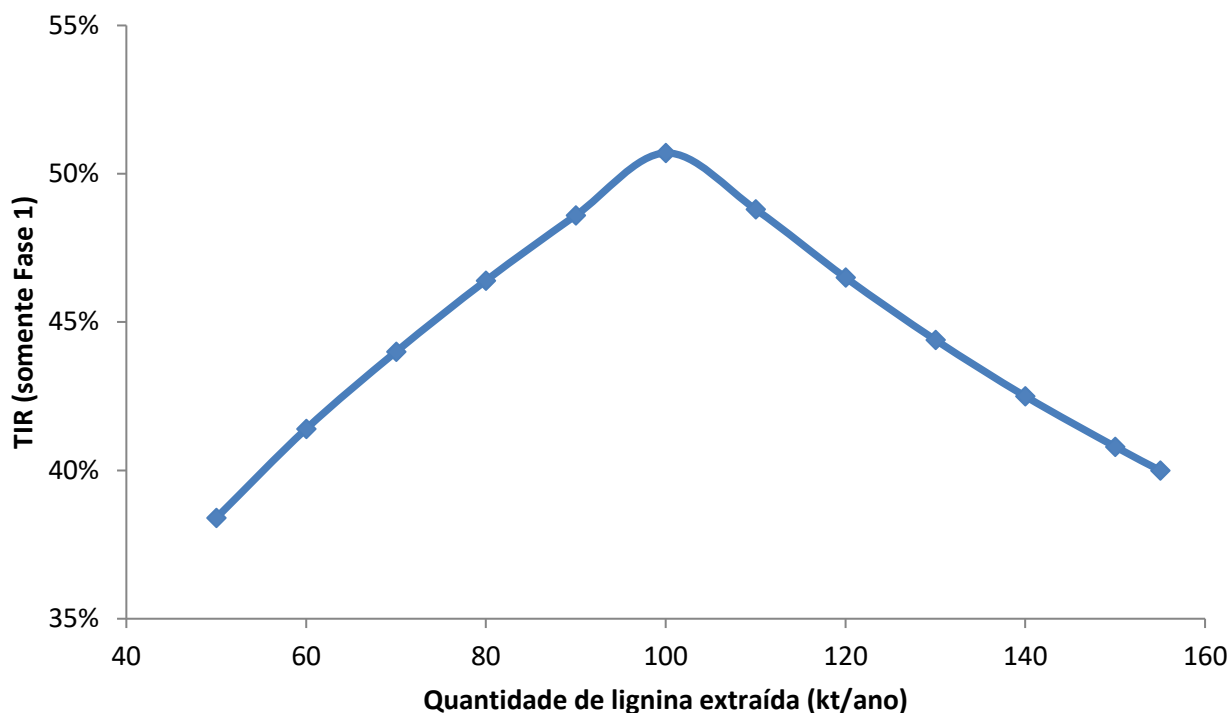
Primeiramente, deve-se atentar para o fato que a implantação das unidades ATJ e LTJ é arriscada, devido as tecnologias não estarem completamente desenvolvidas. Sendo assim, existe a possibilidade de não ocorrer a implantação das unidades produtoras de CA, permanecendo o projeto como Fase 1 durante os 25 anos. A única alteração seria a venda da lignina organosolv a partir do 5º ano por 520 US\$/t. Para as Rotas A e B, a escala ótima determinada foi de 2000 t/dia de biomassa seca processada, em decorrência do ganho de escala. Para a Rota C foi de 100 kt/ano de lignina extraída, valor que não corresponde ao máximo de extração possível devido as duas restrições da planta kraft: capacidade da caldeira de recuperação e aumento de no máximo 10% na linha de fibras.

As TIR alcançadas nesses casos para as Rotas A, B (Normal), B (GMO) e C foram de 14,8, 14,1, 18,6 e 50,7%, respectivamente. Nota-se uma discrepância considerável na Rota C, a qual é explicada no tópico seguinte, no qual conclui-se que tal plataforma é inviável para produção de CA. Em relação as Rotas A e B, adotou-se como TIR meta (desconsiderando a inflação), após instalação da unidade ATJ, o valor de 20%. Isso, obviamente, para garantir que haja um ganho real no projeto com a implantação da Fase 2.

#### 6.1.1 Rota C (lignina)

A *Figura 6.1* demonstra a influência da quantidade de lignina extraída do licor preto na TIR, considerando apenas a Fase 1 operando durante todo projeto. A escala foi avaliada de 50 kt/ano a 155 kt/ano de extração, o que corresponde a uma faixa entre 8,0 e 25% de lignina retirada (limite máximo aceitável segundo o fabricante da tecnologia Lignoboost). Nota-se um ponto de máximo em 100 kt/ano, correspondente a 16% de lignina presente no licor preto, resultando numa TIR de 50,7%. Esse perfil parabólico ocorre devido aos dois critérios restritivos adotados para o aumento de polpa celulósica: capacidade da caldeira de recuperação e aumento de 10% na linha de fibras.

De 50 a 100 kt/ano, a limitação é dada pela caldeira, ou seja, a linha de fibras tem seu aumento de produção em patamares menores que 10%. O ponto máximo corresponde, exatamente, onde a restrição passa a ser na linha de fibras, ou seja, a partir dali obtém-se 10% de aumento de produção, passando a sobrar espaço na caldeira de recuperação. Isso é, as retiradas de lignina são maiores, necessitando de uma caldeira auxiliar também maior, entretanto, os ganhos com produção adicional continuam limitados ao valor máximo de 10%, o que prejudica o desempenho e diminui a TIR.



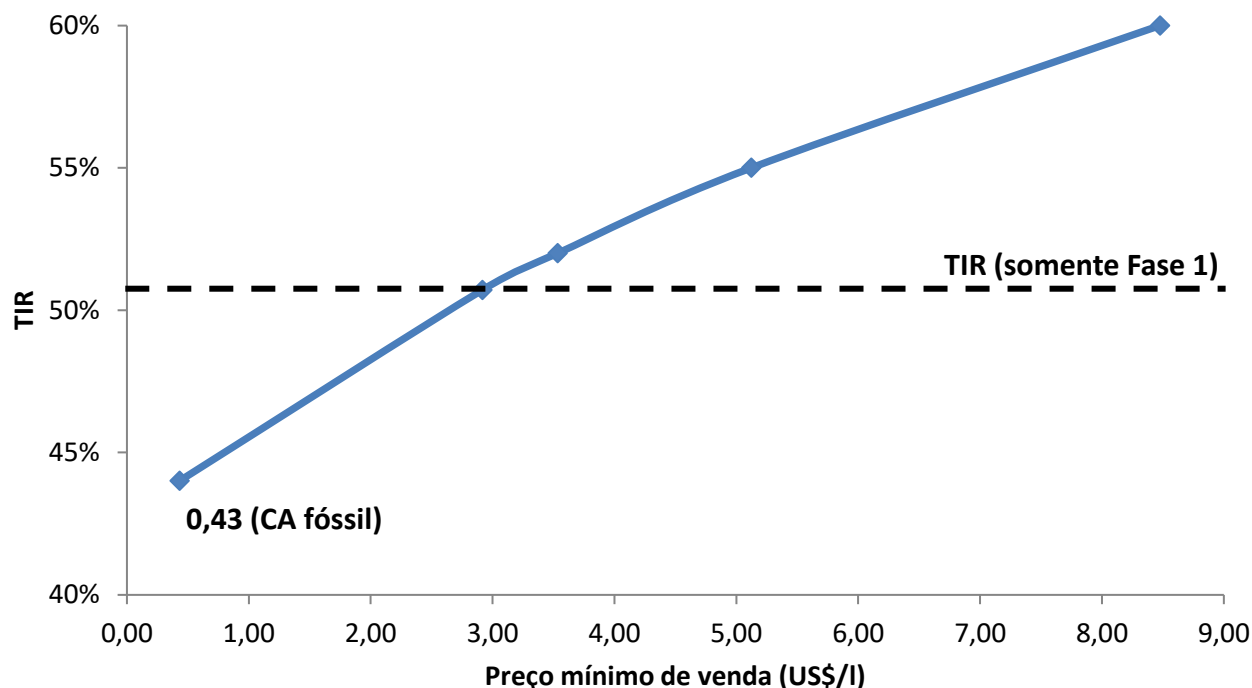
**Figura 6.1:** Influência da escala da unidade Lignoboost na TIR do projeto (somente Fase 1)

Partindo da escala ótima determinada anteriormente, avaliou-se a implantação da Fase 2 no quinto ano, determinando o preço de venda do CA para igualar os 50,7% de TIR. A Figura 6.2 apresenta os resultados obtidos. É possível observar que adotando o preço do CA fóssil, 0,43 US\$/l, obtém uma TIR de 44%, menor que a obtida somente com a Fase 1. Apenas para igualar a performance, o preço de venda requerido é de, aproximadamente, 2,92 US\$/l. Considerando o risco dessa etapa, o elevado premium necessário ( $2,92 - 0,43 = 2,49$  US\$/l) e o fato da situação apenas equiparar o desempenho econômico já obtido apenas com a Fase 1, a Rota C mostrou-se inviável economicamente para produção de CA e, portanto, foi descartada da comparação. Deve-se ter em mente que a TIR de 44% obtida com a venda do CA a 0,43 US\$/l é sim atrativa, ainda mais levando em consideração que não haveria dificuldade para escoar a produção desse biocombustível. O fato dela ter sido descartada está relacionada a sua não atratividade quando comparada a sua Fase 1 durante todo o projeto.

Tal resultado concorda com o estudo realizado por Anheden *et al.* (2017), onde a inviabilidade econômica desse processo também foi constatada. A baixa conversão na etapa LTJ, apenas 18%, atrelada a seu alto custo de capital fixo, é o principal impedimento para essa Rota. Caso 80% de conversão fosse atingido, abaixaria para 1,65 US\$/l o preço de venda para equiparar a TIR da Fase 1. Por outra ótica, considerando que na Fase 2 não houvesse conversão de lignina em CA e essa fosse vendida, seria necessário comercializá-la a 95,4 US\$/t para atingir a TIR de 50,7% obtida com a Fase 1 durante todo o projeto.



Os balanços de massa e energia, assim como o balanço econômico com maiores detalhes para o caso base da Rota C são mostrados nas *Tabelas 11.1 e 11.2* do Apêndice C. O CAPEX da unidade Lignoboost foi tomado como 25 MUS\$ para 50 kt/ano de lignina extraída (informação de especialista). Já o da etapa de hidrodesoxigenação catalítica foi baseado na quantidade de CA gerada, t/ano (Maniatis *et al.*, 2013). Os custos de capital com pátio de madeira, turbina à vapor, caldeira auxiliar, tratamento de efluentes e armazenamento tem as mesmas referências apontadas na *Tabela 6.3*.



**Figura 6.2:** Comportamento do preço mínimo de venda do CA para a Rota C com implantação da Fase 2 do projeto (unidade LTJ)

### 6.1.2 Rotas A (etanol) e B (ABE) - Comparação Geral

Nesse tópico será apresentada uma comparação geral entre as Rotas A, B (Normal) e B (GMO). Em seguida, cada uma delas será tratada especificamente, a fim de mostrar resultados mais detalhados.

Em relação as Rotas A e B, adotou-se como TIR meta, após implantação das unidades ATJ, o valor de 20%. Os principais resultados para cada opção avaliada são mostrados na *Tabela 6.1*. Já a *Figura 6.3* demonstra sinteticamente os fluxos mássicos mais importantes de cada umas das rotas estudadas, assim como a quantidade de CA gerada. É possível observar que a Rota B (Normal) apresenta o pior desempenho entre elas, 2,83 US\$/l. Por outro lado, as Rotas A e B (GMO) resultaram em valores praticamente iguais, 1,75 e 1,74, mas ainda sim muito distantes do preço praticado no mercado brasileiro para o CA fóssil, 0,43 US\$/l (ANP, 2017). Esses resultados

são consonantes às avaliações técnico-econômicas da literatura, onde MSP entre 1,00 e 2,00 US\$/l predominaram para a plataforma ATJ, conforme apresentado na seção 4.8.

**Tabela 6.1:** Principais parâmetros técnico-econômicos para as três opções estudadas, considerando projeto com TIR de 20%

Parâmetro	Rota A	Rota B (Normal)	Rota B (GMO)
Escala ótima (t/dia biomassa seca)	2000	2000	2000
MSP (US\$/l)	1,75	2,83	1,74
VPL (MUS\$)	489,5	517,6	453,5
Tempo de retorno (anos)	8,5	8,3	8,0
CAPEX (MUS\$)	292,5	281,6	301,1
Receita (MUS\$/ano)	237,7	244,1	227,6
OPEX (MUS\$/ano)	85,9	87,3	95,7
Produção ( $\cdot 10^3$ m <sup>3</sup> CA/ano)	97,3	54,0	81,4
Impacto no pátio de madeira <sup>a</sup>	29,5%	29,5%	29,5%
Impacto energia elétrica <sup>b</sup> (MW)	-15,8	-17,9	-20,5
Impacto no tratamento de efluentes <sup>c</sup>	17%	30,2%	31,3%
Produtividade (gal CA/t biomassa)	36,2	20,1	30,3
Eficiência energética <sup>d</sup> (GJ-Fuel/t CA)	72,7	144,4	104,8
Eficiência de vapor (t vapor/t CA)	11,5	25,8	19,4

<sup>a</sup>Em relação a quantidade de madeira originalmente processada pela usina kraft, 6795 t/dia biomassa seca

<sup>b</sup>Em relação a quantidade de energia elétrica originalmente vendida pela usina kraft, 19,4 MW

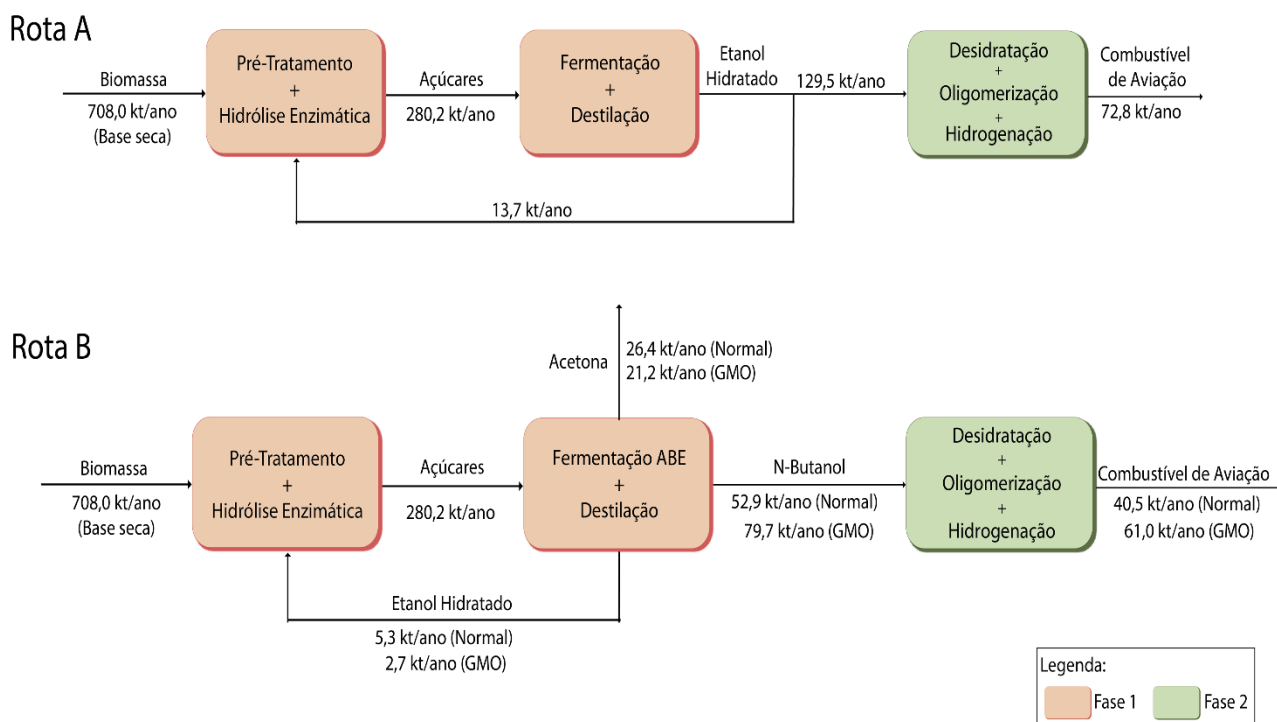
<sup>c</sup>Em relação a quantidade de efluentes originalmente tratada pela usina kraft, 3397 m<sup>3</sup>/h

<sup>d</sup>1 GJ de energia elétrica = 4,76 GJ-Fuel / 1 GJ de vapor = 1,22 GJ-Fuel

Para as opções da Rota B, apenas o n-butanol é convertido em CA, visto que a quantidade de etanol produzida não é suficiente para compor o *make up* do pré-tratamento. Isso explica a diferença entre os volumes de produção apresentados. Cabe destacar que tais volumes são bem menores que a produção nacional, 5,5 Mm<sup>3</sup>/ano, e que a quantidade importada, 1,4 Mm<sup>3</sup>/ano (ANP, 2017). Para todas as Rotas, o principal componente do CAPEX é o pré-tratamento (>30%) e do OPEX é a biomassa (>49%).

Nota-se que as Rotas B (Normal) e B (GMO) apresentaram piores desempenhos em termos energéticos e de geração de efluentes em relação a Rota A. Esse fato está relacionado aos maiores consumos de vapor e produção de vinhaça na fermentação ABE. Já a diferenciação entre as Rotas B (Normal) e (GMO) é explicada por essa última produzir maior quantidade de n-butanol, o que gera maiores consumos na destilação e na unidade ATJ. Cumpre salientar que para a Rota B (GMO), o impacto energético ultrapassa os 19,4 MW originalmente vendidos pela usina kraft, sendo assim, faz-se necessário ainda adquirir 1,1 MW da rede para suprir a demanda dessa opção.

É importante frisar que o CA produzidos nas Rotas A e B, devem possuir características similares em termos de estrutura molecular, já que as plataformas de conversão adotadas nesse estudo são bastante parecidas, sendo predominantemente hidrocarbonetos lineares com pouca ou nenhuma ramificação. Tais biocombustíveis se encaixariam na classificação de SPK e, sendo produzidos por rota ATJ, poderiam ser adicionados a 30 vol% no CA convencional (Mawhood *et al.*, 2014; Pereira *et al.*, 2017).

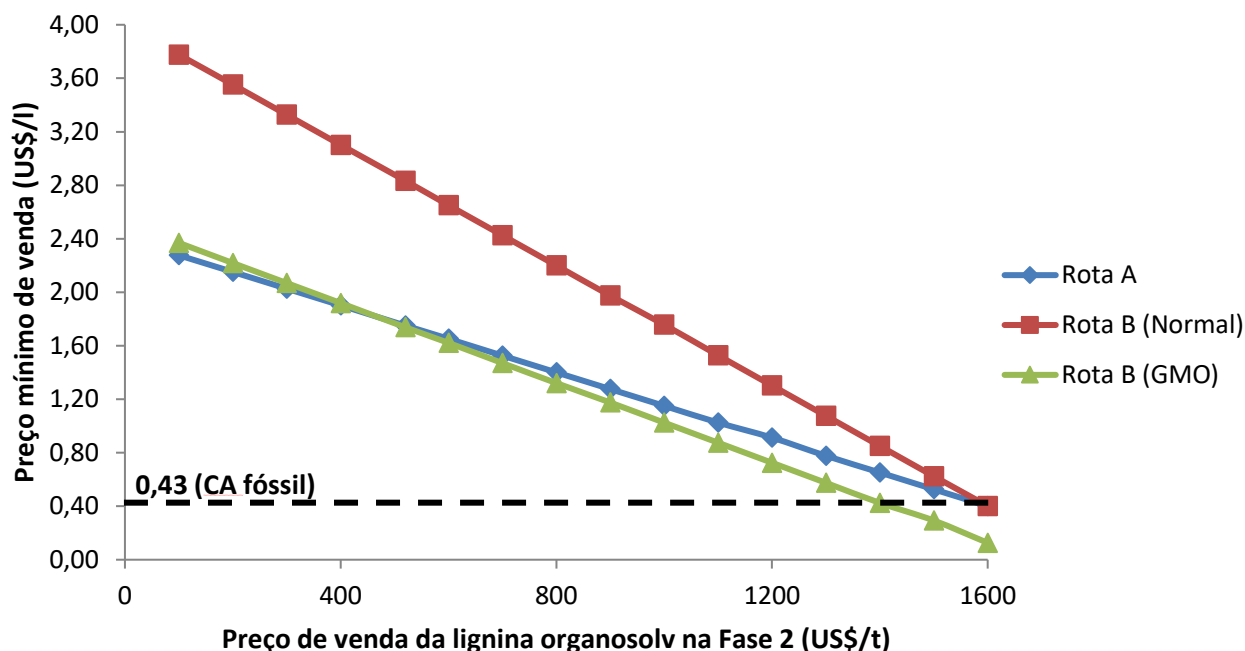


**Figura 6.3:** Principais correntes de processo para as três opções avaliadas

Uma possível válvula de escape para diminuição do preço de venda do combustível é a valorização da lignina organosolv. Michels (2014) relata valores entre 520 e 1100 US\$/t para esse coproduto quando utilizado como agente ligante ou material termoplástico. A suposição de valorizar tal corrobora com estudos recentes que buscam aplicações mais nobres para esse polímero, como para produção de resinas epóxi, fenólicas, materiais termoplásticos, carvão ativo e fibras de carbono (Smaranda e Tucu, 2011; Tomani *et al.*, 2011). A Figura 6.4 expõe a diminuição do preço de venda do CA para as três rotas conforme valorização desse resíduo.

A fim de atingir o valor do CA fóssil, 0,43 US\$/l, tal corrente deveria ser comercializada a 1400 US\$/t para Rota B (GMO) e 1600 US\$/t para as Rotas A e B (Normal) durante a Fase 2 do projeto. Entretanto, cabe destacar que a valorização desse resíduo prescinde da implantação da unidade ATJ. Dessa maneira, TIR maiores que 20% seriam obtidas com esses novos preços de lignina e Fase 1 durante todo projeto. Em suma, para que a unidade ATJ seja vantajosa,

inevitavelmente os preços de venda do CA renovável deverão ser maiores que o do mercado brasileiro. Pois, quanto o preço de venda é reduzido a patamares mais próximos, a TIR com Fase 2 torna-se pior que a da Fase 1 durante todo projeto.



**Figura 6.4:** Comportamento do preço mínimo de venda do CA renovável frente a valorização da lignina organosolv (vendida após o quinto ano) para as três opções avaliadas

Em relação a análise de risco, foi executada uma simulação Monte Carlo com 5000 iterações e oito parâmetros variados em cada uma das opções, conforme mostrado na *Tabela 6.2*. Os resultados são mostrados nas *Figuras 6.5* e *6.6*. Examinando os resultados obtidos, percebe-se que, para todas as opções avaliadas, as médias estatísticas dos preços de venda dos CA são maiores que os valores obtidos para o caso base: 2,24, 3,47 e 2,40 US\$/l para as Rotas A, B (Normal) e B (GMO), respectivamente. Essa análise de risco demonstra que, provavelmente, o caso base está com valores mais arrojadados (não conservadores).

Por outra ótica, percebe-se que a probabilidade do preço de venda ser menor que 2,00 US\$/l é de 34,3, 4,9 e 30,1% para as Rotas A, B (Normal) e B (GMO), respectivamente. Já o valor do CA onde a probabilidade cumulativa atinge 70% é de 2,50, 3,93 e 2,75 US\$/l, respectivamente. Percebe-se então a tendência do preço de venda ser maior que o obtido para o caso base, além da Rota A mostrar-se ligeiramente mais adequada.

Nota-se ainda, pela *Figura 6.6*, que as distribuições de probabilidade das Rotas B (Normal) e (GMO) são mais largas, enquanto a obtida para a Rota A é mais estreita. O fator que origina esse fenômeno é o desvio padrão no preço considerado para o n-butanol (0,21), que corresponde à 17,4% da média. Enquanto no preço do etanol seu desvio padrão corresponde a uma

parcela menor, 14,9%. Além, é claro, da diferença entre as três opções devido a quantidade de CA produzida por cada uma delas.

**Tabela 6.2:** Distribuições definidas para simulação Monte Carlo da análise técnico-econômica

Variável	Distribuição	Referência
Distribuição triangular <sup>a</sup>		
Celulose extraída no organosolv	80:90:100	Info. de especialista
Conversão celulose para hexoses	65:77,4:90	Info. de especialista
Conversão glicose para etanol <sup>b</sup>	46:48,5:51,1	Info. de especialista
Conversão de hexoses <sup>c</sup>	90:95:100	Info. de especialista
CAPEX - Fase 1	-25%:Caso base:+50%	Info. de especialista
Custo da biomassa (US\$/t)	55,4:69,3:83,2	Info. de especialista
Preço lignina organosolv - Fase 2 (US\$/t)	520:780:1100	Nitzsche <i>et al.</i> (2016)
Carga de enzima (g/g celulose)	0,0059:0,01:0,02	Davis <i>et al.</i> (2015)
Distribuição normal <sup>d</sup>		
Preço etanol hidratado <sup>b,e</sup> (US\$/l)	0,4879 ± 0,0731	CEPEA/ESALQ (2016)
Preço n-butanol <sup>c,f</sup> (US\$/kg)	1,21 ± 0,21	AliceWeb/MDIC (2016)

<sup>a</sup>Caracterizada pelos valores: mínimo, mais comum (maior ocorrência) e máximo

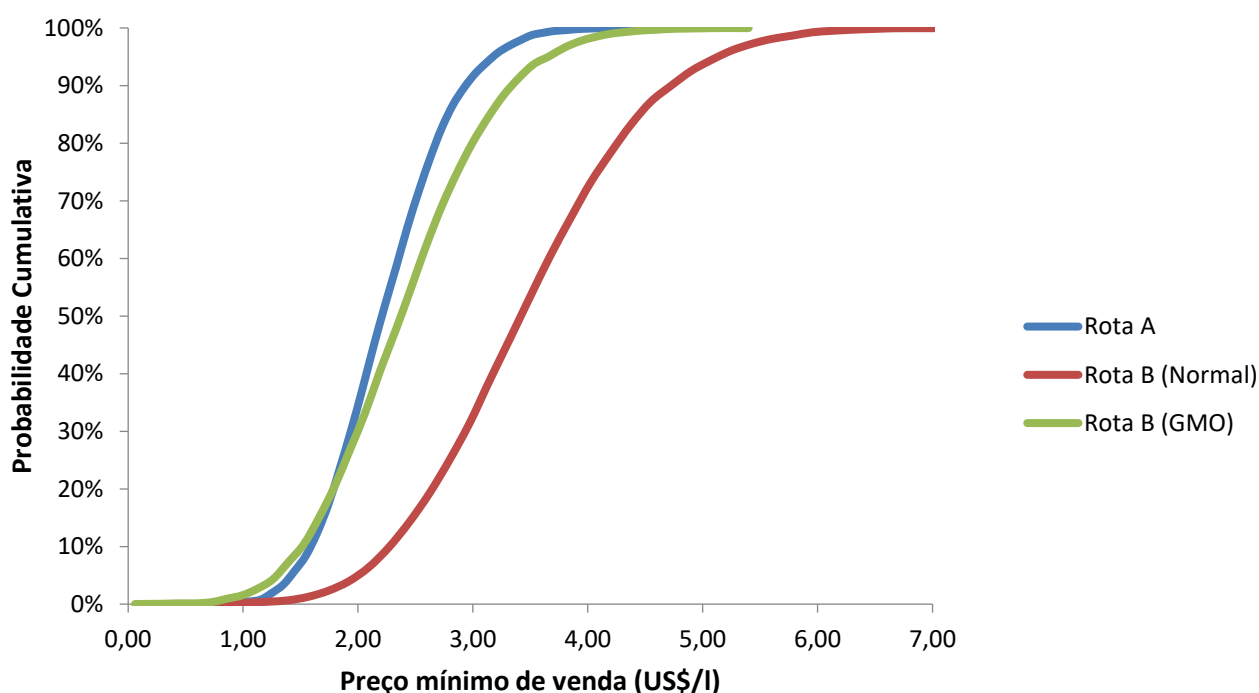
<sup>b</sup>Somente para a Rota A

<sup>c</sup>Somente para a Rota B

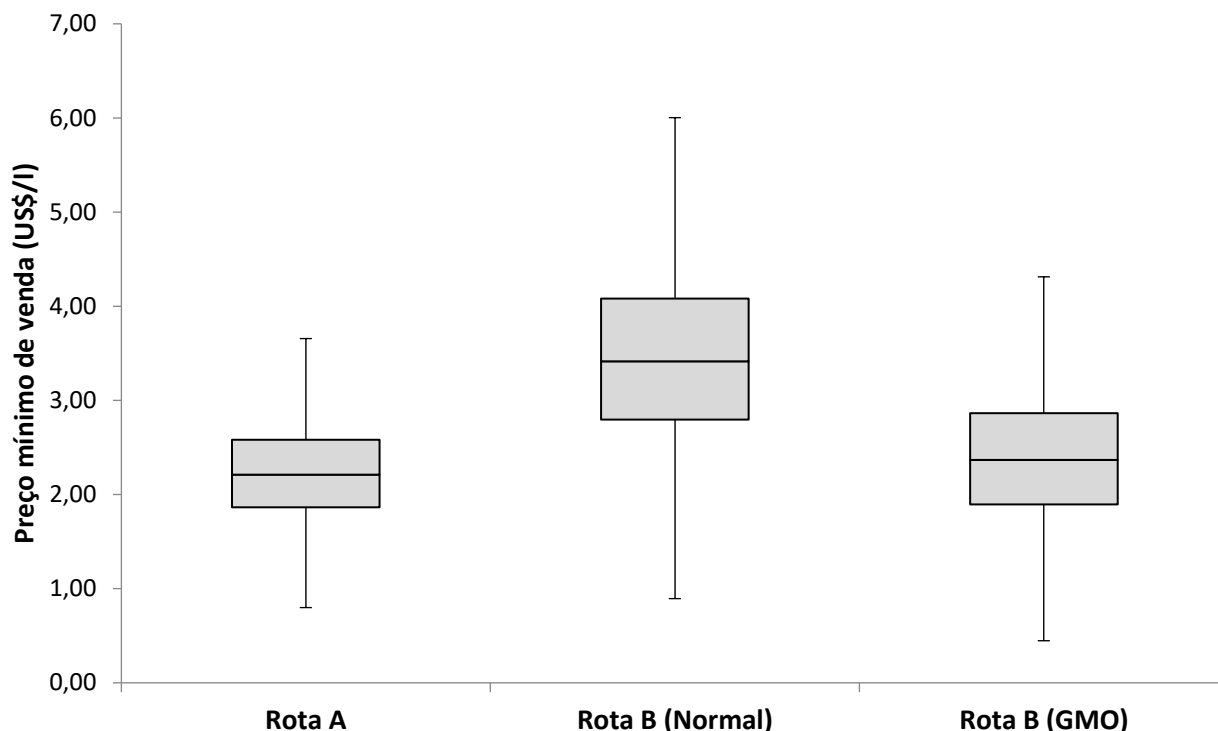
<sup>d</sup>Caracterizada por um valor médio mais ou menos o desvio padrão

<sup>e</sup>Média das safras 2013 - 2016

<sup>f</sup>Média das importações brasileiras entre 2013 – 2015



**Figura 6.5:** Distribuição cumulativa do preço de venda do CA para as três opções avaliadas



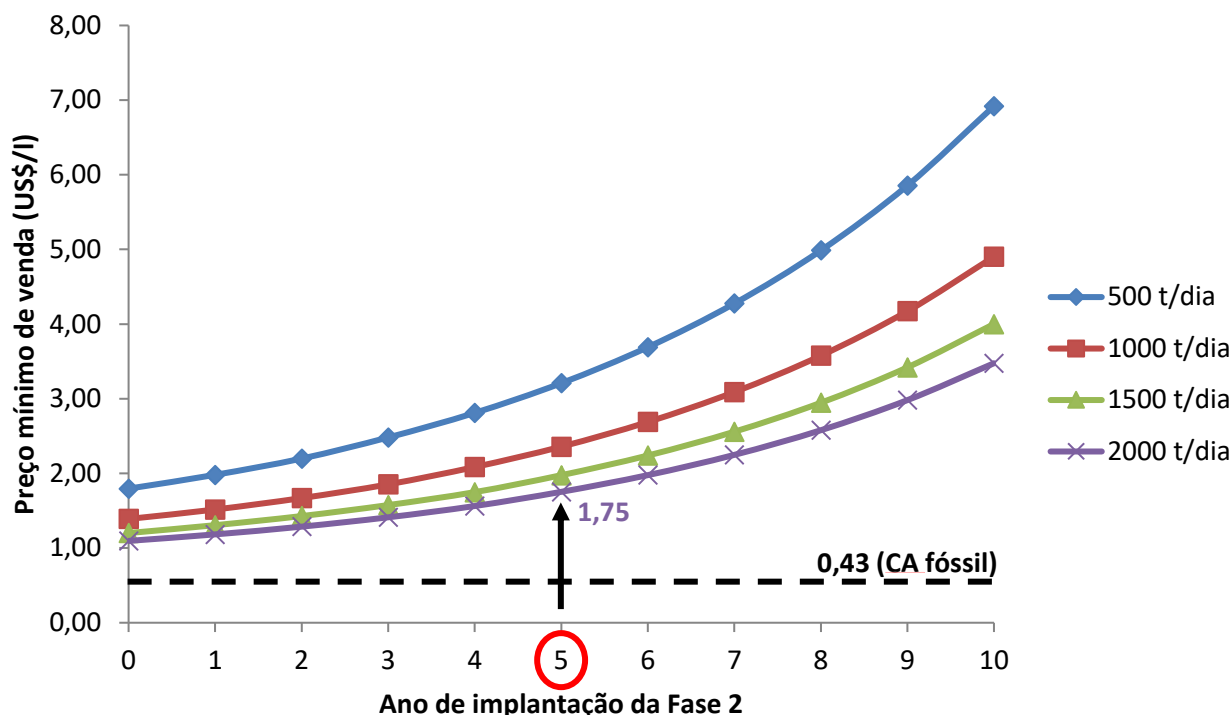
**Figura 6.6:** Resultado da simulação Monte Carlo para a análise técnico-econômica em *boxplot*\*

\*Sequência ascendente do *boxplot*: menor valor excluindo *outliers*, 1º quartil, mediana, 3º quartil e maior valor excluindo *outliers*

### 6.1.3 Rota A

A Figura 6.7 mostra o comparativo entre as diferentes escalas de biomassa seca processada e o ano de implantação da segunda fase do projeto em relação ao preço mínimo de venda do CA, a fim de atingir uma TIR de 20%. O comportamento crescente das curvas indica a necessidade de aumentar o preço de venda do CA para atingir o mesmo valor de TIR na medida que a duração da Fase 1 aumenta. Ou seja, tem-se menos tempo para a Fase 2 recuperar o investimento e atingir a TIR desejada, culminando num aumento de preço para cumprir isso.

Analisando as curvas é possível perceber o ganho de escala, sendo a mais atrativa, isso é, a que apresentou menores preços de venda de CA, a de 2000 t/dia de biomassa seca processada. Em relação ao ano de implantação da Fase 2, o ideal seria no ano zero, onde o menor preço de venda é requerido. Entretanto, como já comentado, a plataforma ATJ não está completamente dominada, inviabilizando essa opção. Portanto, o caso base para essa rota foi tomado como escala de 2000 t/dia de biomassa, Fase 2 implantada no quinto ano e preço de venda do CA de 1,75 US\$/l. Tal valor ainda é bastante elevado quando comparado com a média de preços do CA fóssil no Brasil: 0,43 US\$/l (ANP, 2017). Para essa conformação, o VPL obtida é de 489,5 MUS\$ e o tempo de retorno do investimento corresponde a 8,5 anos.



**Figura 6.7:** Comportamento do preço mínimo de venda do CA de acordo com a quantidade de biomassa seca processada e ano de implantação da Fase 2 para Rota A

Os balanços de massa e energia, assim como o balanço econômico com maiores detalhes para o caso base da Rota A são mostrados nas *Tabelas 9.1 e 9.2* do Apêndice A. A *Tabela 6.3* apresenta a repartição do CAPEX total do projeto, enquanto a *Tabela 6.4* mostra as composições do OPEX e receita das Fases 1 e 2.

Nota-se que a unidade de pré-tratamento organosolv é a que mais contribui para o custo de capital fixo do projeto, respondendo por 35% desse. Logo em seguida, tem-se a unidade de conversão de etanol em CA, a qual representa 27%. Destaca-se ainda a terceira maior contribuição é da caldeira auxiliar adquirida para comportar a queima das correntes secundárias da biorrefinaria, 11% do CAPEX total.

Em relação ao OPEX, é saliente a contribuição do custo com biomassa, correspondendo a mais de 50% do custo operacional total em ambas as fases. Além disso, nota-se que enzima, catalisadores utilizados na etapa ATJ e o impacto energético são fatores significativos no OPEX da Fase 2. Já sobre a composição da receita, além dos produtos principais, destaca-se a presença da energia elétrica na Fase 1. Essa foi obtida a partir do saldo positivo gerado pela queima das correntes provenientes da biorrefinaria (lignina hidrólise e lignina organosolv), mesmo com a retirada de vapor e energia elétrica, em relação a situação de operação da planta kraft sozinha. Essa fração não se repete na Fase 2, pois a lignina organosolv passa a ser vendida.

**Tabela 6.3:** Discriminação do CAPEX para o caso base da Rota A

Unidade	CAPEX (MUS\$)	% do Total	Referência
Pré-tratamento (organosolv)	100,9	34,5	Nitzsche <i>et al.</i> (2016)
Hidrólise enzimática	19,7	6,7	Nitzsche <i>et al.</i> (2016)
Fermentação	14,9	5,1	Nitzsche <i>et al.</i> (2016)
Destilação	12,8	4,4	Nitzsche <i>et al.</i> (2016)
ATJ	79,8	27,3	Crawford (2013)
Armazenamento	10,3	3,5	Tao <i>et al.</i> (2013)
Tratamento de efluentes	11,1	3,8	Kazi <i>et al.</i> (2010)
Pátio de madeira	2,3	0,8	Info. de especialista
Caldeira auxiliar	33,0	11,3	Humbird <i>et al.</i> (2011)
Turbina à vapor	7,6	2,6	Ekbom <i>et al.</i> (2003)
<b>TOTAL</b>	<b>292,5</b>	-	-

Em termos específicos, isso é, o OPEX por unidade de produto principal produzido em cada uma das fases, tem-se os valores de 0,3527 US\$/l de etanol e 0,8837 US\$/l de CA para as Fases 1 e 2, respectivamente. Observa-se que há margem de lucro na Fase 1 com a venda do etanol a preço de mercado, 0,4879 US\$/l (CEPEA/ESALQ, 2016). Fato esse que não se repetiria na Fase 2, caso o CA fosse comercializado com o preço do convencional, 0,43 US\$/l (ANP, 2017). Para se ter uma ideia, na Fase 2, somente o custo operacional específico com biomassa já ultrapassa tal valor, 0,49 US\$/l de CA. Ademais, nota-se o aumento do custo operacional total por litro de produto, o que está condizente com o fato das conversões nas etapas de desidratação e oligomerização diminuir a quantidade de CA produzida em relação ao etanol.

Para a análise de sensibilidade do projeto, tanto parâmetros técnicos (principais conversões de cada etapa) como econômicos (custos mais relevantes), foram avaliados. A *Figura 6.8* exibe o diagrama tornado obtido, evidenciando a influência de cada parâmetro no MSP do CA. É possível observar que as conversões envolvendo celulose e glicose são os fatores mais influentes no projeto, enquanto os que tratam da hemicelulose e xilose não são significativos. Isso pode ser explicado pela natureza do pré-tratamento estudado, o qual gera uma corrente de líquido sobrenadante com grande quantidade de açúcares C5, a qual é encaminhada para o tratamento de efluentes e não para as unidades seguintes que produzirão os combustíveis.

Ainda em termos técnicos, nota-se que a etapa de fermentação (conversão de C6), pelo diagrama tornado obtido, é o principal gargalo, seguida pela hidrólise enzimática (conversão de celulose), pré-tratamento (extração de celulose) e, por fim, unidade ATJ (conversão de etanol). Em relação aos parâmetros econômicos, como era de se esperar devido sua grande contribuição no OPEX, o preço de venda do CA é bastante sensível ao custo com biomassa. Além disso, constata-se



que o CAPEX da Fase 1 é preponderante sobre o da Fase 2 por causa do alto custo da unidade de pré-tratamento organosolv.

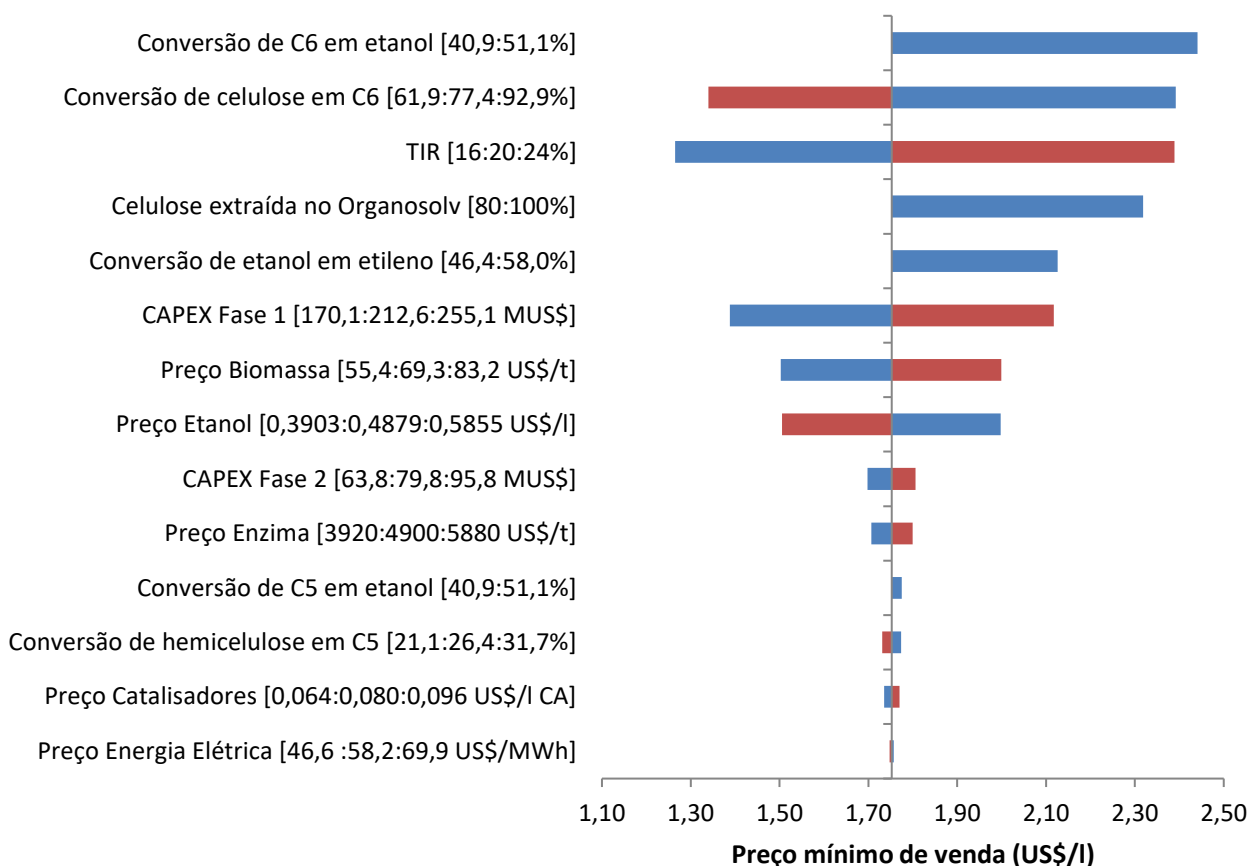
**Tabela 6.4:** Composição do OPEX e Receitas para o caso base da Rota A

Parâmetro	Fase 1		Fase 2	
	Valor	% do Total	Valor	% do Total
<b>OPEX (MUS\$/ano)</b>				
Manutenção	4,3	6,7	5,8	6,8
Mão de obra	2,1	3,3	2,9	3,4
Biomassa	47,5	74,2	47,5	55,3
Enzima	9,0	14,1	9,0	10,5
Levedura	0,09	0,1	0,09	0,1
Catalisadores	-	-	7,8	9,1
Gás natural	-	-	4,0	4,7
Energia elétrica	-	-	7,8	9,1
Etanol (solvente)	-	-	-	-
Tratamento de efluentes	1,0	1,6	1,0	1,2
<b>TOTAL</b>	<b>64,0</b>	-	<b>85,9</b>	-
<b>Receitas (MUS\$/ano)</b>				
Etanol	80,0	92,9	-	-
Energia elétrica	6,1	7,1	-	-
Combustível de aviação	-	-	170,6	71,8
Lignina organosolv	-	-	63,3	26,6
Etileno	-	-	3,8	1,6
<b>TOTAL</b>	<b>86,1</b>	-	<b>237,7</b>	-

É possível observar que mesmo com a variação dos 14 parâmetros avaliados não se atingiu um valor próximo ao preço de mercado brasileiro para CA, 0,43 US\$/l (ANP, 2017). Caso os cinco critérios mais influentes, exceto a TIR, que podem diminuir o preço do CA fossem melhorados em 21,7% conjuntamente, o valor de venda atingiria 0,43 US\$/l, preço do CA fóssil no Brasil. Sob outra ótica, para que um preço de 1,00 US\$/l seja alcançado, deve haver uma melhora conjunta de 11,6% nessas cinco variáveis. Entretanto, é importante frisar que melhoras dessa magnitude em algumas variáveis são difíceis de serem alcançadas, como por exemplo, no aumento da conversão de celulose em C6.

Por fim, cabe esclarecer que o fato de algumas barras se apresentarem apenas para um dos lados está associado às condições estipuladas para o caso base. Ou seja, conversões que já

havia sido tomadas como máximas não poderiam ser aumentadas ainda mais, sendo realizada a análise apenas para a diminuição desses valores.



**Figura 6.8:** Análise de sensibilidade sobre o caso base da Rota A, onde as barras vermelhas e azuis representam, respectivamente, aumento e diminuição da variável em 20%

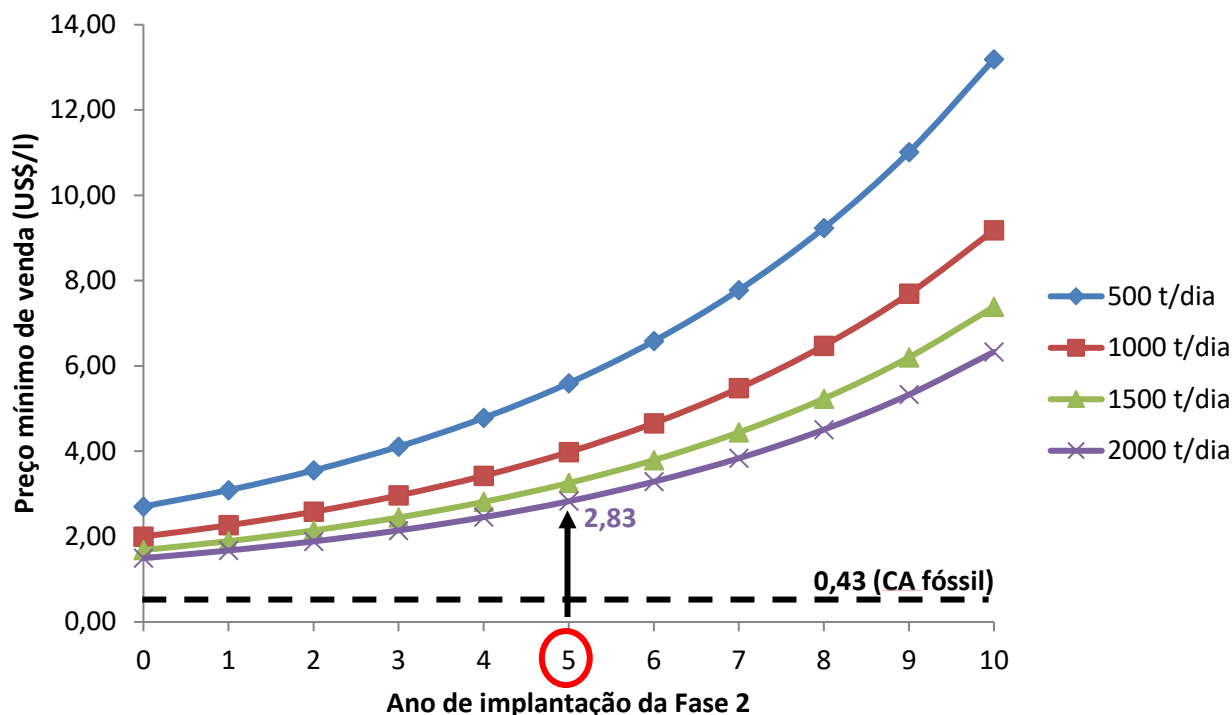
#### 6.1.4 Rota B (Normal)

A *Figura 6.9* mostra o comparativo escala de biomassa seca processada, ano de implantação da Fase 2 e MSP do CA para o caso da Rota B utilizando microrganismo normal, tendo como meta uma TIR de 20%. As escalas estudadas foram as mesmas apresentadas na Rota A.

É possível observar comportamento análogo ao discutido para a Rota A, todavia, com valores maiores para os preços mínimos de venda. Partindo então do mesmo raciocínio conformado para a rota anterior, o caso base dessa rota também foi tomado como escala de 2000 t/dia de biomassa seca processada, com preço de venda do CA de 2,83 US\$/l para implantação da unidade ATJ no quinto ano de projeto. Para essa situação o VPL é de 517,6 MUS\$ e tempo de retorno do investimento de 8,3 anos.

Os balanços de massa e energia, assim como o balanço econômico com maiores detalhes para o caso base da Rota B (Normal) são mostrados nas *Tabelas 10.1 e 10.2* do Apêndice

B. A *Tabela 6.5* apresenta a repartição do CAPEX total do projeto, enquanto a *Tabela 6.6* mostra as composições do OPEX e receita das Fases 1 e 2.



**Figura 6.9:** Comportamento do preço mínimo de venda do CA de acordo com a quantidade de biomassa seca processada e ano de implantação da Fase 2 para Rota B (Normal)

Assim como verificado para a Rota A, o pré-tratamento é a etapa mais influente no custo de capital, correspondendo a 36%. Percebe-se, para esse caso, que a unidade ATJ representa uma parcela bem menor do CAPEX total em relação à Rota A, apenas 15%. Isso é explicado pela menor produção de CA na Rota B (Normal), conforme já evidenciado na seção 6.1.2. Por outro lado, mostra-se relevante a contribuição da etapa de fermentação ABE e da caldeira auxiliar adquirida, representando 12% cada uma.

Também como auferido para a Rota A, o custo com biomassa é preponderante (>50% do total), tanto na Fase 1 quanto na Fase 2. Destaca-se também a presença do custo operacional relacionado ao *make up* de etanol para o pré-tratamento, visto que a quantidade desse químico gerada na fermentação ABE é insuficiente para repor totalmente as perdas ocorridas, sendo necessária compra de solvente para complementação. É por esse mesmo motivo que, na composição da receita, esse produto não aparece como contribuinte, além de não se fazer necessária a construção da unidade de condensação, a qual teria como objetivo converter o etanol em butanol. Por último, nota-se a presença da acetona como receita em ambas as fases, visto que ela não é convertida em CA.

**Tabela 6.5:** Discriminação do CAPEX para o caso base da Rota B (Normal)

Unidade	CAPEX (MUS\$)	% do Total	Referência
Pré-tratamento (organosolv)	100,9	35,8%	Nitzsche <i>et al.</i> (2016)
Hidrólise enzimática	19,7	7,0%	Nitzsche <i>et al.</i> (2016)
Fermentação ABE	35,3	12,5%	Humbird <i>et al.</i> (2011)
Destilação	19,0	6,7%	Abdi <i>et al.</i> (2016)
ATJ	40,6	14,4%	Atsonios (2015)
Armazenamento	7,5	2,7%	Tao <i>et al.</i> (2013)
Tratamento de efluentes	15,7	5,6%	Kazi <i>et al.</i> (2010)
Pátio de madeira	2,3	0,8%	Info. de especialista
Caldeira auxiliar	33,0	11,7%	Humbird <i>et al.</i> (2011)
Turbina à vapor	7,6	2,7%	Ekbom <i>et al.</i> (2003)
<b>TOTAL</b>	<b>281,6</b>	-	-

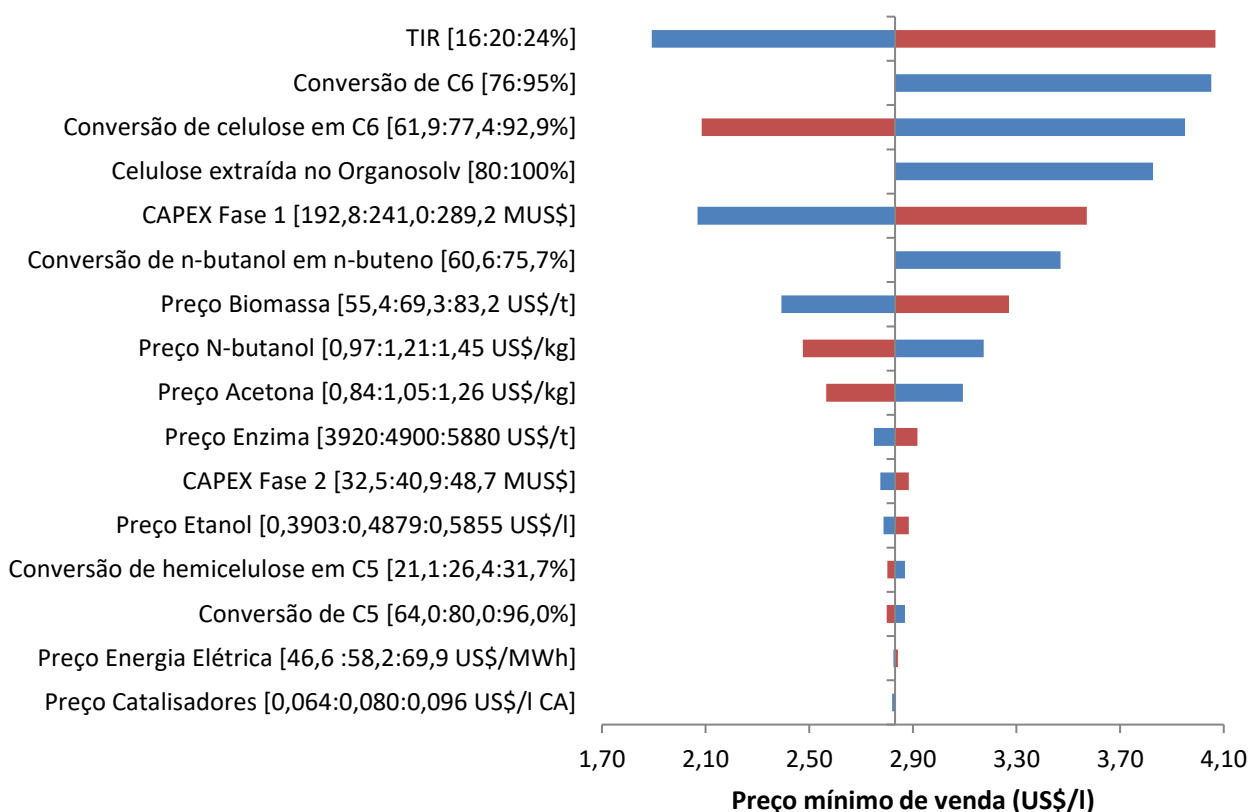
**Tabela 6.6:** Composição do OPEX e Receitas para o caso base da Rota B (Normal)

Parâmetro	Fase 1		Fase 2	
	Valor	% do Total	Valor	% do Total
OPEX (MUS\$/ano)				
Manutenção	4,8	6,8%	5,6	6,4%
Mão de obra	2,4	3,4%	2,8	3,2%
Biomassa	47,5	67,3%	47,5	54,4%
Enzima	9,0	12,7%	9,0	10,3%
Microrganismo	-	-	-	-
Catalisadores	-	-	4,3	4,9%
Gás natural	-	-	2,2	2,5%
Energia elétrica	-	-	8,8	10,1%
Etanol (solvente)	5,2	7,4%	5,2	6,0%
Tratamento de efluentes	1,7	2,4%	1,7	1,9%
<b>TOTAL</b>	<b>70,6</b>	-	<b>87,3</b>	-
Receitas (MUS\$/ano)				
N-butanol	64,0	66,7%	-	-
Energia elétrica	4,1	4,3%	-	-
Acetona	27,8	29,0%	27,8	11,4%
Combustível de aviação	-	-	153,0	62,7%
Lignina organosolv	-	-	63,3	25,9%
<b>TOTAL</b>	<b>95,9</b>	-	<b>244,1</b>	-

Em termos específicos, o OPEX resultou em valores de 0,67 US\$/l de ABE e 1,62 US\$/l de CA para as Fases 1 e 2, respectivamente. Considerando que o preço da mistura ABE foi

calculado como uma média ponderada dos rendimentos de cada composto por seu preço de mercado, a margem de lucro na Fase 1 é de 0,23 US\$/l de ABE. Já para Fase 2, não haveria lucro caso o CA produzido fosse comercializado ao preço do convencional, 0,43 US\$/l (ANP, 2017). Só o custo específico com biomassa já atinge 0,88 US\$/l de CA, praticamente duas vezes o preço do combustível de origem fóssil.

A *Figura 6.10* exibe o diagrama tornado obtido, evidenciando a influência de cada parâmetro no MSP do CA. Variações de  $\pm 20\%$  foram avaliadas em relação aos valores do caso base. Assim como observado para a Rota A, as conversões envolvendo celulose e glicose tem mais influência do que as que tratam de hemicelulose e xilose devido à natureza do pré-tratamento utilizado. A sequência de gargalos técnicos também foi a mesma observada para a Rota A: fermentação (conversão de C6), hidrólise enzimática (conversão de celulose), pré-tratamento (extração de celulose) e, por último, unidade ATJ (conversão de n-butanol). Do ponto de vista econômico, além do custo com biomassa e CAPEX da Fase 1, merece destaque a acetona, produto secundário produzido durante as Fases 1 e 2 do projeto e que não é encaminhado para a unidade ATJ para ser convertido em CA.

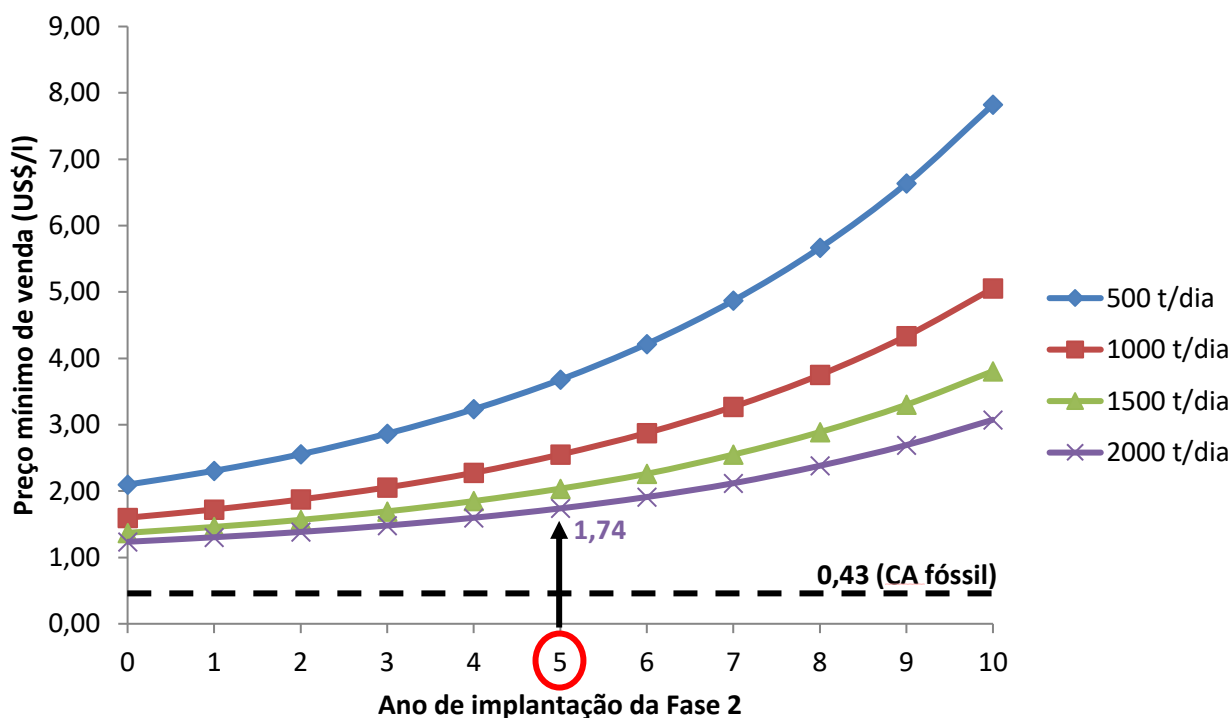


**Figura 6.10:** Análise de sensibilidade sobre o caso base da Rota B (Normal), onde as barras vermelhas e azuis representam, respectivamente, aumento e diminuição da variável em 20%

Se os cinco principais parâmetros que podem diminuir o preço de venda do CA: conversão de celulose em C6, CAPEX Fase 1, preço biomassa, preços n-butanol e acetona fossem melhorados em 20,1% (todos juntos), o valor de venda atingiria o preço do combustível convencional no mercado brasileiro, 0,43 US\$/l. Enquanto que para alcançar o preço de 1,00 US\$/l faz-se necessária uma melhora conjunta de 14,9% em todas essas variáveis. Novamente, deve-se destacar que melhoras dessa ordem podem ser difíceis de serem concretizadas, principalmente quando se trata de conversões. Análogo ao explicado para a Rota A, o fato de algumas barras se apresentarem apenas para um dos lados está relacionado as considerações adotadas para o caso base, as quais limitavam o aumento da variável em 20%, a fim de impedir que conversões maiores que 100% fossem avaliadas.

### 6.1.5 Rota B (GMO)

Os mesmos procedimentos realizados para as Rotas A e B (Normal) foram feitos para a Rota B (GMO). A *Figura 6.11* mostra o comparativo quantidade de biomassa seca processada, ano de implantação da Fase 2 e MSP do CA para esse caso, tendo como meta uma TIR de 20%.



**Figura 6.11:** Comportamento do preço mínimo de venda do CA de acordo com a quantidade de biomassa seca processada e ano de implantação da Fase 2 para Rota B (GMO)

Aplicando o mesmo raciocínio adotado para as rotas anteriores, o caso base dessa rota também foi tomado como escala de 2000 t/dia de biomassa seca processada, MSP do CA de 1,74

US\$/l, sendo a unidade ATJ construída no quinto ano de projeto. Nessa situação o VPL obtido é de 453,5 MUS\$ e o tempo de retorno do investimento de 8,0 anos.

Os balanços de massa e energia, assim como o balanço econômico com maiores detalhes para o caso base da Rota B (GMO) são mostrados nas *Tabelas 10.1 e 10.2* do Apêndice B, juntamente com os da Rota B (Normal). A *Tabela 6.7* apresenta a repartição do CAPEX total do projeto, enquanto a *Tabela 6.8* mostra as composições do OPEX e receita das Fases 1 e 2.

Novamente o pré-tratamento é a etapa mais influente no CAPEX, correspondendo a 33%. Em seguida, tem-se a unidade ATJ, fermentação e caldeira auxiliar, sendo 17, 13 e 11% do custo de capital total, respectivamente.

**Tabela 6.7:** Discriminação do CAPEX para o caso base da Rota B (GMO)

Unidade	CAPEX (MUS\$)	% do Total	Referência
Pré-tratamento (organosolv)	100,9	33,5	Nitzsche <i>et al.</i> (2016)
Hidrólise enzimática	19,7	6,5	Nitzsche <i>et al.</i> (2016)
Fermentação ABE	39,8	13,2	Humbird <i>et al.</i> (2011)
Destilação	21,4	7,1	Abdi <i>et al.</i> (2016)
ATJ	52,0	17,3	Atsonios (2015)
Armazenamento	8,4	2,8	Tao <i>et al.</i> (2013)
Tratamento de efluentes	16,0	5,3	Kazi <i>et al.</i> (2010)
Pátio de madeira	2,3	0,8	Info. de especialista
Caldeira auxiliar	33,0	11,0	Humbird <i>et al.</i> (2011)
Turbina à vapor	7,6	2,5	Ekbom <i>et al.</i> (2003)
<b>TOTAL</b>	<b>301,1</b>	-	-

Em relação ao custo operacional, nota-se que, seguindo a mesma característica obtida para as outras opções avaliadas, a biomassa é a maior contribuidora, correspondendo a 49% na Fase 2. Assim como explicado para a Rota B (Normal), a quantidade de etanol gerada na fermentação não é suficiente para suprir as perdas no pré-tratamento, dessa maneira, há uma parcela de custo pela compra desse solvente. Observa-se ainda que o impacto energético, enzima e catalisadores são fatias consideráveis do OPEX.

Já sobre as receitas, não há presença do etanol por ele ter sido totalmente reciclado para o pré-tratamento. Além disso, percebe-se que a acetona responde por uma parcela de apenas 18% na Fase 1, sendo bem menor que a da Rota B (Normal), 29%. Isso é explicado pelos rendimentos na fermentação utilizando os diferentes microrganismos, já que o GMO aumenta a produção de n-butanol, diminuindo, entretanto, as produções de acetona e etanol referencialmente ao Normal.

**Tabela 6.8:** Composição do OPEX e Receitas para o caso base da Rota B (GMO)

Parâmetro	Fase 1		Fase 2	
	Valor	% do Total	Valor	% do Total
<b>OPEX (MUS\$/ano)</b>				
Manutenção	5,0	6,7%	6,0	6,3
Mão de obra	2,5	3,4%	3,0	3,1
Biomassa	47,5	64,0%	47,5	49,6
Enzima	9,0	12,1%	9,0	9,4
Microorganismo	1,6	2,2%	1,6	1,7
Catalisadores	-	-	6,5	6,8
Gás natural	-	-	3,4	3,6
Energia elétrica	-	-	10,1	10,6
Etanol (solvente)	6,8	9,2%	6,8	7,1
Tratamento de efluentes	1,8	2,4%	1,8	1,9
<b>TOTAL</b>	<b>74,2</b>	-	<b>95,7</b>	-
<b>Receitas (MUS\$/ano)</b>				
N-butanol	96,4	79,0	-	-
Energia elétrica	3,4	2,8	-	-
Acetona	22,3	18,3	22,3	9,8
Combustível de aviação	-	-	142,0	62,4
Lignina organosolv	-	-	63,3	27,8
<b>TOTAL</b>	<b>122,1</b>	-	<b>227,6</b>	-

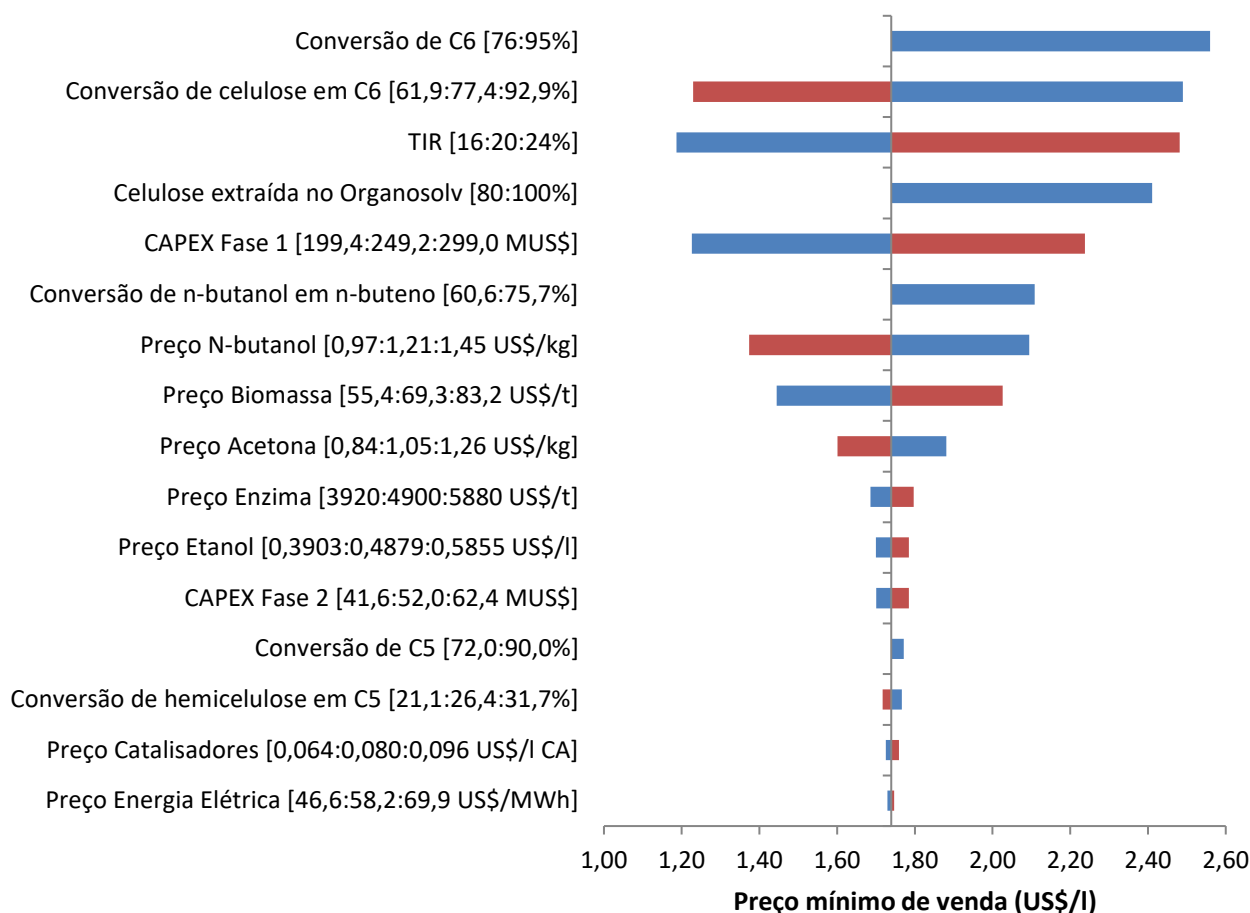
Em termos específicos de OPEX, atingiu-se os valores de 0,58 US\$/l de ABE e 1,18 US\$/l de CA para as Fases 1 e 2, respectivamente. O preço da mistura ABE foi calculado como uma média ponderada dos rendimentos de cada composto por seu preço de mercado, resultando em 0,94 US\$/l. Novamente, como observado para as Rotas A e B (Normal), há margem de lucro na Fase 1. Entretanto, na Fase 2, se fosse comercializado ao preço do CA fóssil, 0,43 US\$/l, não haveria. Somente o OPEX específico com biomassa já corresponde a 0,58 US\$/l de CA.

A *Figura 6.12* exibe o diagrama tornado obtido com variações de  $\pm 20\%$  em alguns parâmetros do projeto, mostrando a quais deles os resultados obtidos para a Rota B (GMO) são mais sensíveis. Nota-se que os parâmetros com influência mais significativa foram os mesmos determinados para a Rota B (Normal).

Em relação ao aspecto de gargalos técnicos, a mesma sequência comentada para as Rotas A e B (Normal) também foi obtida para essa opção. Somente sobre o ponto de vista econômico houve uma pequena modificação. Enquanto para a Rota B (Normal), o custo da biomassa foi mais influente que o preço do n-butanol, para a Rota B (GMO), esse é mais influente



que aquele. Isso pode ser explicado pela maior produção desse químico nessa opção, o que faz com que o projeto como um todo fique mais sensível a suas variações.



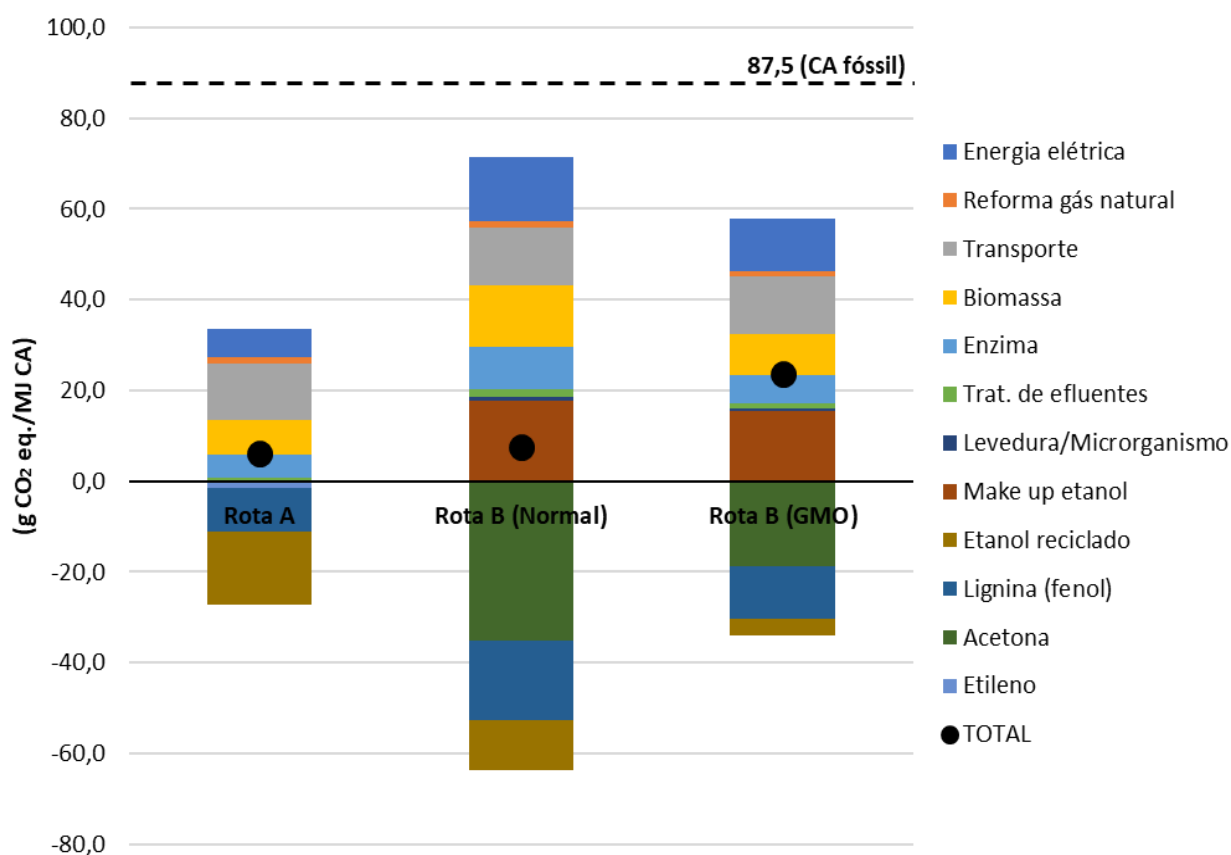
**Figura 6.12:** Análise de sensibilidade sobre o caso base da Rota B (GMO), onde as barras vermelhas e azuis representam, respectivamente, aumento e diminuição da variável em 20%

Apesar de, com esses 16 parâmetros sendo variados não se tenha obtido valores próximos ao preço de mercado brasileiro para o CA (0,43 US\$/l), cabe notar que a diminuição do preço da biomassa ou do CAPEX da Fase 1 são capazes de reduzir o preço mínimo de venda a valores que requeiram *premium* de menos de 1,00 US\$/l. Mesma conclusão obtém-se caso a conversão de celulose em glicose ou o preço de venda do n-butanol sejam aumentados.

Se os cinco principais parâmetros que podem diminuir o preço de venda do CA: conversão de celulose, CAPEX Fase 1, preço n-butanol, custo com biomassa e preço da acetona fossem melhorados em 15% (todos juntos), o valor de venda atingiria o preço do CA convencional no mercado brasileiro 0,43 US\$/l. Já para alcançar o preço de 1,00 US\$/l faz-se necessária uma melhora conjunta de 8,2% em todas essas variáveis.

## 6.2 Avaliação de ciclo de vida (ACV)

A Figura 6.13 mostra o GWP das opções avaliadas utilizando o método de alocação por substituição. A energia elétrica aparece como impacto negativo pois, apesar dos créditos pela geração adicional, o consumo da energia proveniente da usina kraft é maior. Outros impactos negativos de destaque são: transporte, biomassa, enzima e *make up* de etanol. Esse último ocorre apenas nas Rotas B (Normal) e B (GMO), pois a quantidade de etanol produzida na fermentação é insuficiente para repor toda perda no pré-tratamento, sendo necessário comprar esse solvente. Isso também se reflete no crédito pelo etanol reciclado, onde o maior valor foi obtido na Rota A, enquanto o menor na Rota B (GMO). Além disso, nota-se que o crédito pela acetona produzida é relevante, porém, não é capaz de compensar totalmente o impacto negativo causado pelo *make up* de etanol.

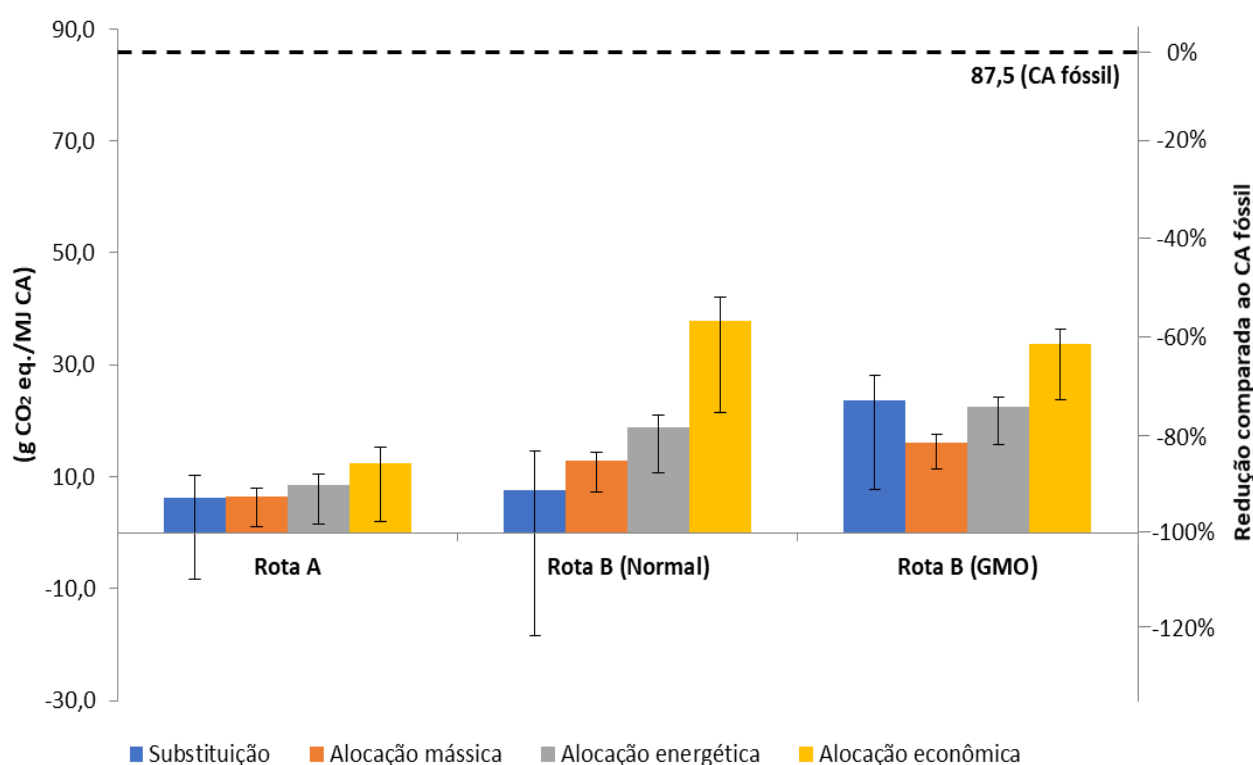


**Figura 6.13:** GWP (alocação por substituição) para as Rotas A, B (Normal) e B (GMO)

Dessa maneira, conclui-se que a utilização do pré-tratamento organosolv é mais atrativo do ponto de vista ambiental quando um dos produtos da biorrefinaria for etanol em quantidade suficiente para repor a perda. As pegadas de carbono das Rotas A, B (Normal) e B (GMO) foram de 6,3, 7,6 e 23,7 g CO<sub>2</sub> eq./MJ, respectivamente, o que corresponde a diminuições de 93, 91 e 73% comparada ao CA de origem fóssil, 87,5 g CO<sub>2</sub> eq./MJ (Staples *et al.*, 2014).

Considerando a máxima mistura de CA renovável produzida por plataformas ATJ, 30 vol%, a pegada de carbono geral seria de 63,1, 63,5 e 68,4 g CO<sub>2</sub> eq./MJ para as Rotas A, B (Normal) e B (GMO), respectivamente. Já o preço dessa mistura atingiria 0,83, 1,15 e 0,82 US\$/l. Nesse cenário, para suprir o *premium* (diferença entre o preço da mistura e o do CA fóssil), os créditos de carbono deveriam ser comercializados a 500, 930 e 630 US\$/t CO<sub>2</sub> eq., respectivamente. Por outro lado, para que a mistura tenha GWP 50% menor que o CA fóssil, seriam necessários 54, 55 e 69 vol% de combustível renovável, resultando em preços de 1,14, 1,74 e 1,33.

A Figura 6.14 apresenta o comparativo de todas as formas de alocação estudadas. Em todos os casos, há redução significativa comparada ao CA de origem fóssil, ressaltando o melhor desempenho para Rota A, independente da alocação utilizada.



**Figura 6.14:** Variação do GWP em relação a diferentes formas de alocação dos coprodutos para as três rotas estudadas

Barra colorida: crédito da energia elétrica gerada como matriz energética brasileira  
 Barra de erro inferior: crédito da energia elétrica gerada como queima do gás natural  
 Barra de erro superior: crédito da energia elétrica gerada como hidroelétrica

A alocação econômica resultou em valores maiores devido a utilização do MSP calculado na avaliação técnico-econômica. A creditação da energia elétrica como gerada pela queima de gás natural proporciona maior abatimento, resultando até mesmo em captura de carbono para as Rotas A e B (Normal) na alocação por substituição. Reduções entre 86-93%, 57-91% e 61-

82% foram obtidas, respectivamente, para as Rotas A, B (Normal) e B (GMO) comparado ao CA convencional, considerando creditação de energia elétrica como matriz energética brasileira e os quatro tipos de alocação avaliados.

Comparativamente à cana de açúcar, uma das culturas brasileiras mais importante, de Jong *et al.* (2017) constatou reduções entre 71-75% por ATJ (etanol) utilizando cana de açúcar como biomassa. Isso demonstra uma vantagem da utilização do eucalipto como biomassa. Sua capacidade de captura de carbono se sobrepõe a da cana devido aos maiores cuidados com o solo, principal reserva de carbono. Destacam-se o menor uso de fertilizantes, técnicas mais modernas que evitam compactação do solo e o preparo reduzido. Ao contrário da cultura canavieira que requer processos de aragem e gradagem anualmente, o que prejudica a fixação de carbono (de Oliveira e de Oliveira, 2017).

Os resultados da ACV com maiores detalhes para as Rotas A, B (Normal) e B (GMO) são apresentados nas *Tabelas 9.3* (Apêndice A), *10.3* e *10.4* (Apêndice B), respectivamente.

### 6.3 Tomada de decisão por múltiplos critérios (MCDM)

Para a aplicação da MCDM, três categorias distintas foram consideradas: econômica, competitividade e ambiental. Os sete parâmetros escolhidos são mostrados na *Tabela 6.9*, assim como os valores para cada uma das rotas avaliadas. VPL, TIC/Produção, TIR - Fase 1, RTMU e  $\Delta$ GWP são critérios que quanto maior o resultado, melhor. Já MSP e Riscos técnicos são parâmetros onde valores menores são desejáveis. É possível notar que as Rotas A e B (GMO) apresentam melhor desempenho em tais critérios, enquanto a Rota B (Normal) apresenta pior resultado em cinco dos sete parâmetros avaliados.

Algumas considerações foram tomadas a fim de realizar a simulação Monte Carlo e aproximá-la de possíveis escolhas de um painel de especialistas:

- i. O critério mais importante é escolhido entre MSP, TIR - Fase 1 e TIC/Produção. A escolha foi variada como distribuição triangular, onde cada um deles foi testado com maior ocorrência.
- ii. O valor *target* é selecionado de forma aleatória nas faixas de 0,43 - 0,54 US\$/l para MSP, 20 - 30% para TIR - Fase 1 e 2,5 - 5 US\$/gal para TIC/Produção.
- iii. Os valores de *trade-off* também são selecionados de forma aleatória, podendo aumentar nas faixas de 0 - 100% para MSP e TIC/Produção ou diminuir de 0 - 50% para TIR - Fase 1. Lembrando que tais porcentagens são aplicadas sobre o valor *target* definido.

O intervalo para o valor *target* e as porcentagens de *trade-off* foram definidos com base em projetos de biorrefinarias em geral e auxílio de especialista.

**Tabela 6.9:** Critérios de diferentes categorias selecionados para aplicação da MCDM

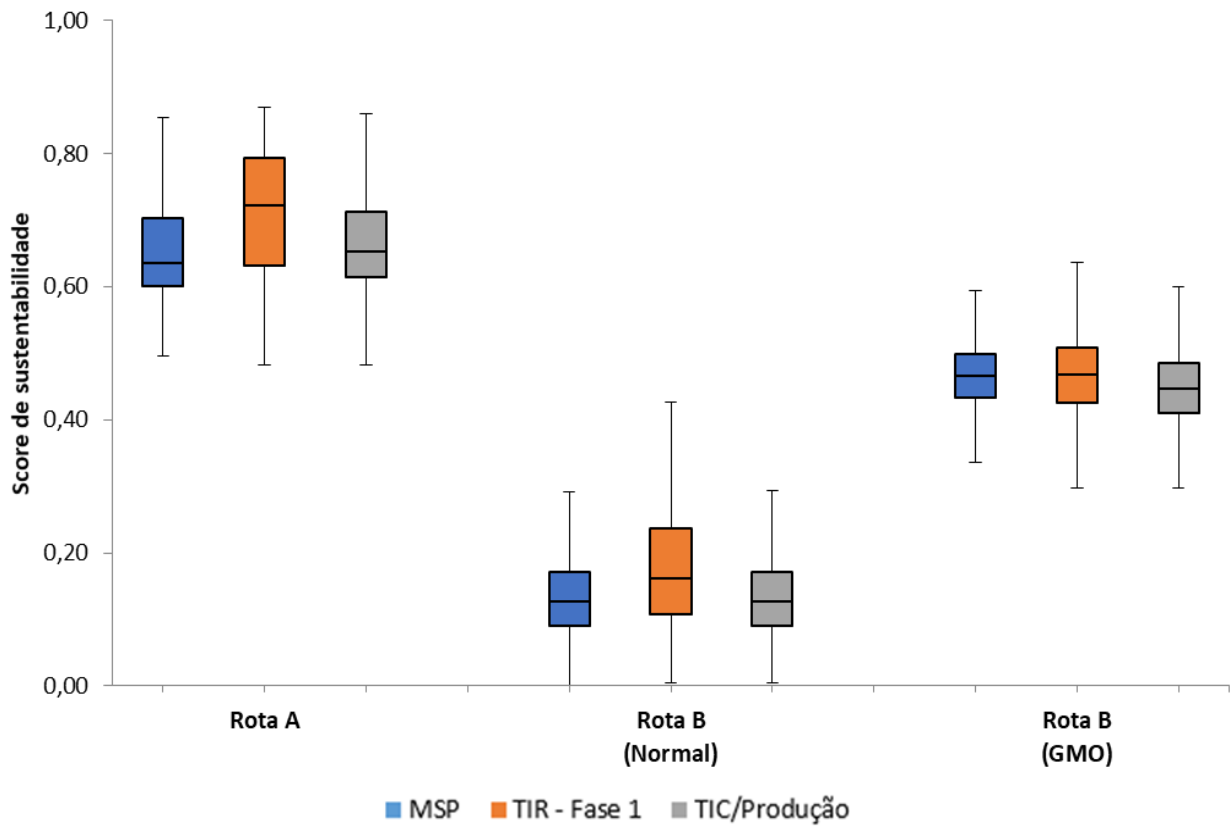
<b>Categoria</b>	<b>Critério</b>	<b>Descrição</b>	<b>Rota A</b>	<b>Rota B (Normal)</b>	<b>Rota B (GMO)</b>
Econômica	VPL (MUS\$)	Valor presente líquido do projeto	483,4	257,0	451,6
	TIC/Produção (US\$/gal)	Razão entre o custo total de capital fixo e a produção de CA	12,0	20,8	14,7
	TIR - Fase 1	Taxa interna de retorno se não ocorrer implantação da unidade de conversão ATJ	14,8	14,1	18,6
Competitividade	MSP (US\$/l)	Preço mínimo de venda do CA para atingir uma TIR de 20%	1,75	2,83	1,74
	RTMU <sup>a</sup>	Resistência a incertezas do mercado: EBIT/Custo (matérias-primas + energia)	1,79	1,09	1,37
	Riscos técnicos <sup>b</sup>	Risco relacionado à etapa de fermentação (Escala 1 - 5)	1,5	2,0	5,0
Ambiental	$\Delta$ GWP (g CO <sub>2</sub> eq./MJ)	Potencial de aquecimento global (deixa de emitir em relação ao CA de origem fóssil)	81,2	79,9	63,8

<sup>a</sup>EBIT = Receita – OPEX – Depreciação

<sup>b</sup>Valor 1 representa risco baixo e valor 5 alto. Está relacionado a etapa de fermentação devido ao restante do processo ser basicamente o mesmo para as Rotas A e B

O resultado obtido pela simulação Monte Carlo com 5000 iterações e oito variáveis é mostrado na *Figura 6.15*. Como evidenciado anteriormente, a Rota B (Normal) apresenta os menores valores para o *score de sustentabilidade*, descartando completamente o investimento nessa opção. Percebe-se que a Rota A obteve os maiores valores para o *score*, sendo que apenas valores extremos da Rota B (GMO) são capazes de equiparar os resultados.

A probabilidade do score de sustentabilidade da Rota B (GMO) ser maior que a Rota A foi menor que 1% para as três opções de parâmetro mais importante analisadas. Dessa forma, conclui-se que a Rota A seria a escolha mais adequada para um possível investidor. Ressalta-se ainda a importância de aplicação da MCDM para esse caso, visto que, caso a comparação fosse realizada apenas pelo MSP calculado (decisão convencional), não seria possível discernir qual seria a mais atraente (empate: 1,75 e 1,74 US\$/l para as Rotas A e B (GMO), respectivamente).



**Figura 6.15:** Resultado da simulação Monte Carlo para a MCDM em *boxplot*\*

(cada cor representa o parâmetro como critério central da distribuição triangular)

\*Sequência ascendente do *boxplot*: menor valor excluindo *outliers*, 1º quartil, mediana, 3º quartil e maior valor excluindo *outliers*

As distribuições dos pesos de cada critério obtidas nas simulações Monte Carlo, considerando os três diferentes parâmetros centrais: MSP, TIR (Fase 1) e TIC/Produção, são mostradas nas *Figuras 12.1, 12.2 e 12.3* do Apêndice D.

## 7 Conclusões e Sugestões para próximos trabalhos

Como se pôde observar, a implementação da unidade produtora de CA para Rota C (lignina) se mostrou totalmente inviável devido à baixa conversão na etapa LTJ. Sendo mais lucrativo e muito menos arriscado permanecer somente com a Fase 1 durante os 25 anos de projeto.

Em relação as outras três opções estudadas, Rotas A, B (Normal) e B (GMO) percebe-se que nenhuma delas apresentou preços de venda para o CA renovável que fossem minimamente competitivos no mercado brasileiro. Mesmo a Rota B (GMO), para qual se obteve o menor valor entre as possibilidades estudadas, esse é quase 4 vezes o preço do CA de origem fóssil, o que torna o projeto não atrativo para possíveis investidores. Tais resultados estão de acordo com o reportado pela literatura, apresentado na seção 4.8, onde as plataformas ATJ e LTJ levam a preços bem mais elevados que o de mercado.

Diversas causas contribuem para que tais projetos ainda sejam inviáveis. A primeira delas reside no fato das tecnologias de conversão de álcoois e lignina em CA não estarem completamente desenvolvidas/dominadas, além dos riscos técnicos inerentes a isso. Sendo assim, torna-se impraticável instalá-las desde o início do projeto, o que levaria a uma diminuição dos preços de venda requeridos.

Outro ponto que merece atenção é o cenário econômico atual. A alta do dólar e, principalmente, a queda no preço do barril de petróleo contribuem para diminuição do preço do combustível de origem fóssil e dificultam ainda mais a implantação de projetos como os estudados nesse trabalho. Dessa maneira, aguardar um momento de maior estabilidade econômica para instalação dessas tecnologias é um aspecto a ser levado em consideração.

Em relação a pegada de carbono, as opções avaliadas resultaram em uma redução considerável quando comparado ao GWP do CA fóssil para todas as formas de alocação estudadas. Entretanto, os valores de venda dos créditos de carbono obtidos por essas plataformas teriam que ser maiores que 500 US\$/t CO<sub>2</sub> eq. capturado para cobrir o *premium* necessário. Tendo em vista que valores atuais para tais créditos margeiam os 30 US\$/t, tal opção torna-se impraticável no mercado.

Sob o ponto de vista técnico, a utilização da tecnologia organosolv se torna mais atrativa do ponto de vista ambiental quando um dos produtos da biorrefinaria for etanol em quantidade suficiente para repor a perda no pré-tratamento. Ademais, a utilização do eucalipto como biomassa se mostrou mais vantajosa quando comparada a cana-de-açúcar, devido aos cuidados com o solo e maior fixação de carbono nele.

A aplicação da MCDM por meio da simulação Monte Carlo se apresentou como uma ferramenta robusta e importante para definir a Rota A como mais promissora a investimentos entre as avaliadas. Decisão que não seria possível considerando apenas os preços mínimos de venda calculados, devido ao empate entre as Rotas A e B (GMO) nesse quesito.

A valorização da lignina organosolv é oportunidade interessante e promissora para viabilizar projetos de biorrefinarias. Por esse estudo foi possível perceber que, caso haja um investidor realmente disposto a investir numa usina produtora de CA renovável, a venda dessa corrente secundária a valores razoáveis ( $> 1000$  US\$/t) torna-se imprescindível para garantir a competitividade econômica frente ao CA convencional.

Pensando num contexto global, fica claro que incentivos fiscais/governamentais são necessários para que projetos para produção de CA de fontes renováveis tornem-se realidade nos dias de hoje. Isso torna-se ainda mais contundente lembrando que tais CA renováveis ainda estão em processo de certificação e devem ser utilizados, nesse primeiro momento, misturados ao CA fóssil.

Além disso, deve-se enfatizar a escassez de dados para algumas etapas das rotas estudadas, sendo a etapa de conversão de lignina em CA a mais afetada. Isso simplesmente reflete o nível de maturidade dessas tecnologias, mas não invalida o estudo apresentado nesse trabalho, visto que o projeto é pensado em fase conceitual, por estimativas de ordem de grandeza e incertezas intrínsecas a ele.

Como sugestões complementares a esse trabalho, tem-se a possibilidade de estudo de diferentes pré-tratamentos para as duas primeiras rotas, além do organosolv, assim como novas técnicas fermentativas mais eficientes para a mistura acetona, n-butanol e etanol, a fim de tornar a Rota B mais atrativa. Ainda referente à etapa de fermentação, o estudo da tecnologia IBE (iso-butanol, n-butanol e etanol) é uma oportunidade interessante, já que pode possibilitar maior produção de CA, pois substitui por iso-butanol a acetona, a qual não é convertida no combustível renovável. O estudo de uma biorrefinaria acoplada a usina kraft de celulose envolvendo uma rota tendo bio-óleo como intermediário também é uma oportunidade interessante, já que, como apresentado na seção 4.8, resultados mais promissores foram encontrados para essa plataforma.

O aproveitamento por outras formas, como a geração de biogás pela biodigestão, das correntes secundárias de líquido sobrenadante e vinhaça, é uma oportunidade que merece atenção e pode auxiliar na viabilidade desse tipo de projeto. Levando em consideração que a unidade de pré-tratamento (organosolv) leva a perda de grande parte do C5 presente na biomassa na corrente de líquido sobrenadante, torna-se interessante avaliar a recuperação desses açúcares, destinando-os para a própria unidade de fermentação da biorrefinaria ou venda como insumo.

Por fim, seria interessante analisar a utilização de outro método de MCDM, como o AHP, descrito na seção 4.7, a fim de comparar os resultados obtidos com o MAUT (utilizado nesse trabalho). Além disso, estudar com mais detalhes a Rota C, da lignina extraída do licor preto, para minimizar as incertezas inerentes a baixa disponibilidade de dados da literatura e permitir que etapas subsequentes, como uma avaliação de ciclo de vida, sejam feitas de forma mais robusta.



## 8 Referências Bibliográficas

ABDI, H. K. *et al.* Economic comparison of a continuous ABE fermentation with and without the integration of an situ vacuum separation unit. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v.94, p.833-843, 2016.

ALICEWEB/MDIC. *Importações Brasileiras*. Disponível em: <http://aliceweb.mdic.gov.br/>. Acesso em 04/10/2017.

ANHEDEN, M. *et al.* *Lignojet: Value chain for production of bio-oil from kraft lignina for use as bio-jet fuel*. Nordic Wood Biorefinery Conference, Sweden, 2017.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. *Anuário Estatístico 2016*. Disponível em: [http://www.anp.gov.br/wwwanp/images/publicacoes/Anuario\\_Estatistico\\_ANP\\_2016.pdf](http://www.anp.gov.br/wwwanp/images/publicacoes/Anuario_Estatistico_ANP_2016.pdf). Acesso em 04/10/2017.

ATSONIOS, K. *Alternative thermochemical routes for aviation biofuels via alcohols synthesis: process modeling, techno-economic assessment and comparison*. Greece: National Technical University of Athens, 2015. Thesis (PhD)

BATSY, D. R. *et al.* Product Portfolio Selection and Process Design for the Forest Biorefinery. In: *Integrated Biorefineries - Design, Analysis and Optimization*. CRC Press, 2013.

BAUEN, A. *et al.* Review of the potential for biofuels in aviation. *E4tech*, 2009.

BEDDOES, Z. M. Money that grows on trees. *The Economist*. Brazil, 2016. Disponível em: <http://www.economist.com/news/business/21695530-brazils-economy-crumbling-its-giant-pulp-firms-are-booming-money-grows-trees>. Acesso em 22/04/2017.

BIOFUELS DIGEST. Any alcohol into jet fuel: The Digest's 2016 8-Slide Guide to Byogy. 2016. Disponível em: <http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2016/01/03/any-alcohol-into-jet-fuel-the-digests-2016-8-slide-guide-to-byogy/8/>. Acesso em 05/11/2017.

BOTTEON, C. *Indicadores de Rentabilidade – Curso de Avaliação Socioeconômica de Projetos*. Brasília, 2009.

BUDSBERG, E. *et al.* Hydrocarbon bio-jet fuel from bioconversion of poplar biomass: life cycle assessment. *Biotechnology for Biofuels*, v.9, n.170, 2016.

CADORE, G.; GIASSEN, O. R. *Análise dos Índices Financeiros e Econômicos de uma Importadora de Máquinas, para Possível Investimento*. Brasil: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2012. (TCC de Especialização em Gestão Contábil e Financeira)

CEPEA/ESALQ – USP. *Agricultural Prices*. Disponível em: [http://www.cepea.esalq.usp.br/english/ethanol/?id\\_page=243&full=1](http://www.cepea.esalq.usp.br/english/ethanol/?id_page=243&full=1). Acesso em 04/10/2017.

CHAMBOST, V.; MCNUTT, J.; STUART, P. R. Guided tour: Implementing the forest biorefinery (FBR) at existing pulp and paper mills. *Pulp & Paper Canada*, 109:7, p.19-27, 2008.

COBROR, S. *Sustainable Jet Fuel from PROESA™*. First Annual Workshop of Isaff, Italy, 2014.

COELHO, P. M. *Tabelas de Termodinâmica*. FEUP, Porto, 2012.

COHEN, J. *et al.* Critical Analysis of Emerging Forest Biorefinery (FBR) Technologies for Ethanol Production. *Pulp & Paper Canada*, v.111, n.3, p.24-30, 2010.

CORTEZ, L. A. B. *et al.* *Flightpath to aviation biofuels in Brazil: Action Plan*. São Paulo: Blucher, 2014.

CRAWFORD, J. *Techno-economic analysis of hydrocarbon biofuels from poplar biomass*. United States: School of Environmental and Forest Sciences, University of Washington, 2013. Thesis (Master)

CROSSIN, E. Life cycle assessment of a mallee eucalypt jet fuel. *Biomass and Bioenergy*, v.96, p.162-171, 2017.

DAVIS, R. *et al.* Process Design and Economics for the Conversion of Lignocellulosic Biomass to Hydrocarbons: Dilute-Acid and Enzymatic Deconstruction of Biomass to Sugars and Catalytic Conversion of Sugars to Hydrocarbons. *Technical Report NREL/TP-5100-62498*, 2015.

DIEDERICH, G. W. *Techno-Economic Assessment of Processes that Produce Jet Fuel from Plant-Derived Sources*. South Africa: Stellenbosch, 2015. Thesis (Master)

DOMTAR CORPORATION. *Biochoice™ Lignin: Our Mill, Part of a Global Network*. 2013.

EKBOM, T. *et al. Technical and Commercial Feasibility Study of Black Liquor Gasification with Methanol/DME Production as Motor Fuels for Automotive Uses – BLGMF*. Alterner II, 2003.

ELGOWAINY, A. *et al. Life-Cycle Analysis of Alternative Aviation Fuels in GREET*. Argonne National Laboratory - Energy Systems Division, 2012.

EPA - US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *AP-42: Compilation of Air Pollutant Emission Factors*. Volume 1: Stationary Point and Area Sources, Fifth Edition, Chapter 10, Section 10.2, 1990.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2026*. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético, Ministério de Minas e Energia, 2017a.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *RenovaBio - Papel dos biocombustíveis na matriz energética*. Ministério de Minas e Energia, 2017b.

ERNST & YOUNG. Disponível em: <http://www.ey.com/GL/en/Industries/Mining---Metals/Effective-mining-and-metals-capital-project-execution---Focus-on-stage-gated-delivery-and-early-intervention>. Acesso em 02/04/2016.

FACUNDES, B. C. *Fungos filamentosos produtores de holocelulases prospectados em mata de galeria do cerrado tocantinense*. Brasil: Universidade Federal do Tocantins, 2014. Dissertação (Mestrado)

FAN, J. *et al. A life cycle assessment of pennycress (Thlaspi arvense L.) -derived jet fuel and diesel*. *Biomass Bioenergy*, v.55, p.87-100, 2013.

FORNELL, R.; BERNTSSON, T. Techno-economic analysis of energy efficiency measures in a pulp mill converted to an ethanol production plant. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, v.24 (2), p.183-192, 2009.

FORTIER, M. O. P. *et al.* Life cycle assessment of bio-jet fuel from hydrothermal liquefaction of microalgae. *Applied Energy*, v.122, p.73-82, 2014.

GILANI, B. *Sustainability Assessment of the Hot Water Extraction Biorefinery Process Using a Phased Implementation Approach*. Canada: Département de Génie Chimique, École Polytechnique de Montréal, 2014. Thesis (Master)

GREET. *The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use In Transportation Model*. Argonne National Laboratory, 2010. Disponível em: <http://greet.es.anl.gov/>. Acesso em 04/10/2017.

HUMBERT, D. *et al.*, Process Design and Economics for Biochemical Conversion of Lignocellulosic Biomass to Ethanol: Dilute-Acid Pretreatment and Enzymatic Hydrolysis of Corn Stover. *Technical Report NREL/TP-5100-47764*, 2011.

HYTÖNEN, E. *et al.* (VTT Technical Research Center of Finland). Concept evaluations. *FuBio Seminar*. Finland, 2013.

IATA - INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION. *IATA 2010 Report on Alternative Fuels*. 5<sup>th</sup> Edition, 2010.

ICAO - INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. *Alternative Fuels: Question 4*. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/AltFuels-Q4-1.aspx>. Acesso em 07/11/2017.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *International Standard 13065: Sustainability criteria for bioenergy*. First edition, 2015.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *International Standard 14044: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*. First edition, 2006.

JANSSEN, M.; STUART, P. Drivers and Barriers for Implementation of the Biorefinery. *Pulp & Paper Canada*, v.111, p.13-17, 2010.

JOHNSON, M. A.; HART, P. W. Integrating a Biorefinery into an Operating Kraft Mill. *BioResources*, v.11, n.4, 2016.

JOHNSTON, G. *Alcohol to Jet (ATJ)*. Gevo Company Presentation, 2013. Disponível em: <http://www.alternativefuelsworldwide.com/presentations/Gevo%20Paris%20Airshow%202013.pdf>. Acesso em 05/11/2017.

de JONG S. *et al.* Life-cycle analysis of greenhouse gas emissions from renewable jet fuel production. *Biotechnology Biofuels*, 10:64, 2017.

KAZI, F. K. *et al.* Techno-Economic Analysis of Biochemical Scenarios for Production of Cellulosic Ethanol. National Renewable Energy Laboratory. *Technical Report NREL/TP-6A2-46588*, 2010.

KLEIN, B. C. *et al.* Techno-economic and environmental assessment of renewable jet fuel production in integrated Brazilian sugarcane biorefineries. *Applied Energy*, v.209, p.290-305, 2018.

LIPTOW, C. *et al.* Ethylene based on woody biomass-what are environmental key issues of a possible future Swedish production on industrial scale. *Life Cycle Assessments*, v.18, p.1071-1081, 2013.

MANIATIS, K.; WEITZ, M.; ZSCHOCKE, A. *2 million tons per year: A performing biofuels supply chain for EU aviation*. Biofuel FlightPath Initiative, 2013.

MARIANO, A. P. *et al.* Utilization of pentoses from sugarcane biomass: Techno-economics of biogas vs. butanol production. *Bioresource Technology*, v.142, p.390-399, 2013.

MARIANO, A. P. How Brazilian pulp mills will look like in the future? Technical Article. *O PAPEL*, v.76, n.6, p.55-61, 2015.

MARIANO, A. P.; MACIEL FILHO, R. Improvements in Biobutanol Fermentation and Their Impacts on Distillation Energy Consumption and Wastewater Generation. *Bioenergy Resources*, v.5, p.504-514, 2012.

MARRS, G.; SPINK, T. *Softwood to Jet Fuel Techno-Economics for an Integrated Greenfield Biorefinery*. Northwest Advanced Renewables Alliance, Annual Meeting, 2015.

MAWHOOD, R.; COBAS, A. R.; SLADE, R. Establishing a European renewable jet fuel supply chain: the technoeconomic potential of biomass conversion technologies. *RenJet*, Imperial College London, 2014.

MAYAKI, I. A. *et al.* Sustainable Bioenergy Development in UEMOA Member Countries. *Rural Hub Report*, Chapter 5, 2008.

MEHDIPOOR, A. *Energy Efficiency Measures in an average Scandinavian Kraft Pulp Mill with Hemicelluloses Pre-Extraction*. Sweden: Chalmers University of Technology, 2011. Thesis (Master)

MESA, L. *et al.* Techno-economic evaluation of strategies based on two steps organosolv pretreatment and enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse for ethanol production. *Renewable Energy*, v.86, p.270-279, 2016.

MICHELS, J. ‘*Lignocellulose Biorefinery – Phase 2*’ – *final scientific and technical report of all project partners*. DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie, 2014.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *iNDC (Contribuição Nacionalmente Determinada)*. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/informma/item/10570-indc-contribui%C3%A7%C3%A3o-nacionalmente-determinada>. Acesso em 04/11/2017.

NITZSCHE, R.; BUDZINSKI, M.; GRÖNGRÖFT, A. Techno-economic assessment of a wood-based biorefinery concept for the production of polymer-grade ethylene, organosolv lignin and fuel. *Bioresource Technology*, v.200, p.928-939, 2016.

de OLIVEIRA, Y. M. M.; de OLIVEIRA, E. B. *Plantações Florestais: Geração de Benefícios com Baixo Impacto Ambiental*. Embrapa Florestas, Brasília, 2017.

PALANOV, N. *Life-cycle assessment of Photovoltaic systems - Analysis of environmental impact from the production of PV system including solar panels produced by Gaia Solar*. Sweden: Lund University, 2014. Thesis (Master)

PEREIRA, L. G. *et al.* Economic and environmental assessment of n-butanol production in an integrated first and second generation sugarcane biorefinery: Fermentative versus catalytic routes. *Applied Energy*, v.160, p.120-131, 2015.

PEREIRA, L. G.; MACLEAN, H. L.; SAVILLE, B. A. Financial analyses of potential biojet fuel production technologies. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*, v.11, n.4, p.665-681, 2017.

PETTERSSON, K.; MAHMOUDKHANI, M.; von SCHENK, A. Opportunities for Biorefineries in the Pulping Industry. In: *Systems Perspectives on Biorefineries*. Chapter 5, p.48-58, 2012.

PHYLLIS2. *ECN database of biomass and waste properties*. Disponível em: <https://www.ecn.nl/phyllis2/>. Acesso em 04/10/2017.

PILÃO, N. E.; HUMMEL, P. R. V. *Matemática Financeira e Engenharia Econômica*. Editora Thomson, 2003.

RAMÍREZ, P. K. S. *Análise de métodos de alocação utilizados em avaliação do ciclo de vida*. Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina, 2009. Dissertação (Mestrado)

SANAEI, S. *Sustainability Assessment of Biorefinery Strategies under Uncertainty and Risk Using Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) Approach*. Canada: Département de Génie Chimique, École Polytechnique de Montréal, 2014. Thesis (PhD)

da SILVA, G. A. *et al.* *Avaliação de Ciclo de Vida - Ontologia Terminológica*. Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT). Brasília, 2015.

SMARANDA, A. S.; TUCU, D. *Different Industrial Applications of Lignin as a Sustainable Material*. Buletinul AGIR, Romania, 2011.

SOARES, P. A.; ROSSELL, C. E. V. *Conversão da celulose pela tecnologia Organosolv*. São Paulo: Núcleo de Análise Interdisciplinar de Políticas e Estratégias da Universidade de São Paulo - NAIPPE/USP, v.3, 2009.

STAPLES M. D. *et al.* Lifecycle greenhouse gas footprint and minimum selling price of renewable diesel and jet fuel from fermentation and advanced fermentation production technologies. *Energy & Environmental Science*, v.7, p.1545-1554, 2014.

STRATTON, R.; WONG, H. M.; HILEMAN, J. I. *Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Alternative Jet Fuels*. Massachusetts Institute of Technology, Project 28 Report, 2010.

STUART, P.; CHAMBOST, V.; SANAEI, S. *Retrofit Forest Biorefinery Decision-Making in Eastern Canada*. Workshop on: Effective Decision-Making for Biorefinery Strategy Selection, 2012.

TAO, L. *et al.* Comparative techno-economic analysis and reviews of n-butanol production from corn grain and corn stover. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*, 2013.

TOMANI, P. *et al.* *Integration of lignin removal into a kraft pulp mill and use of lignin as a bio-fuel*. 5<sup>th</sup> International Colloquium on Eucalyptus Pulp, Porto Seguro, Brazil, 2011.

van RENSSSEN, S. Climate battle for the skies. *Nature Climate Change* 2, p.308-309, 2012.

VENDITTI, R. A.; DAYSTAR, J. S.; KELLEY, S. *Sustainability, Life Cycle Assessment and Green Chemistry*. Department of Forest Biomaterials, North Carolina State University, 2013. Disponível em: <http://www4.ncsu.edu/~richardv/documents/IntrodttoLCAGreenChem82013ReebVenditti.pdf>. Acesso em 20/12/2017.

VERTÈS, A. A.; INUI, M.; YUKAWA, H. Implementing biofuels on a global scale. *Nature Biotechnology*, v.24, n.7, p.761-764, 2006.

VIDAL, A. C. F.; da HORA, A. B. Celulose de fibra longa: uma oportunidade para a indústria brasileira? *BNDES Setorial* 39 - *Papel e Celulose*, p.281-342, 2014.

WANG, H. *et al.* Biomass-derived Lignin to Jet Fuel Range Hydrocarbons via Aqueous Phase Hydrodeoxygenation. *Green Chemistry*, 2015.



WANMOLEE, W.; DAORATTANACHAI, P.; LAOSIRIPOJANA, N. Depolymerization of Organosolv Lignin to Valuable Chemicals over Homogeneous and Heterogeneous Acid Catalysts. *Energy Procedia*, v.100, p.173-177, 2016.

de WILD, P. J.; REITH, H.; HEERES, H. J. Biomass pyrolysis for chemicals. *Biofuels*, v.2, n.2, p.185-208, 2011.

WWF - WORLD WIDE FUND FOR NATURE. *Pulp and Paper*. Disponível em: [http://wwf.panda.org/about\\_our\\_earth/deforestation/forest\\_sector\\_transformation/pulp\\_and\\_paper/](http://wwf.panda.org/about_our_earth/deforestation/forest_sector_transformation/pulp_and_paper/). Acesso em 05/11/2017.

YAO, G. *et al.* Stochastic Techno-Economic Analysis of Alcohol-to-Jet Fuel Production. *Biotechnology for Biofuels*, v.10, n.18, 2017.

ZUCKERMAN, S. Toward Sustainable Aviation Fuels. *Climate Solution*, 2015.

ZVERLOV, V. V. *et al.* Bacterial acetone and butanol production by industrial fermentation in the Soviet Union: use of hydrolyzed agricultural waste for biorefinery. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v.71, p.587-597, 2006.

## 9 Apêndice A: Rota A

**Tabela 9.1:** Balanço de massa e energia detalhado para o caso base da Rota A

<b>Dados Gerais</b>	Biomassa disponível (t/ano)	708000
	Biomassa em base seca “perdida” (t/ano)	22656
	Biomassa em base seca alimentada (t/ano)	685344
	Biomassa em base úmida alimentada (t/ano)	1370688
	Composição mássica da biomassa seca (t/ano):	
	Celulose	311832
	Hemicelulose	139125
	Lignina	203547
<b>Pré-Tratamento (Organosolv)</b>	Extrativos	30840
	Solvente utilizado (t/ano):	
	Etanol no solvente utilizado	5482752
	Água no solvente utilizado	2741376
	Etanol recuperado (t/ano)	2741376
	Etanol perdido (t/ano)	2727669
	Solução 1% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> utilizada (t/ano)	13707
	Solução 1% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> utilizada (t/ano)	6442
	Corrente para hidrólise enzimática (t/ano):	
	Celulose	311832
	Hemicelulose	40031
	Lignina	68392
	Corrente lignina organosolv (t/ano):	
	Lignina	121721
	Água	6406
	Corrente de líquido sobrenadante (t/ano):	
	Açúcares C5	54537
	Lignina	13434
	Outros produtos da hemicelulose	44557
	Extrativos	30840
	Água	3420314

**Tabela 9.1:** Balanço de massa e energia detalhado para o caso base da Rota A (cont.)

	Consumo de energia elétrica (MWh/ano)	112396
	Consumo de vapor de baixa pressão (MWh/ano)	106914
	Consumo de vapor de média pressão (MWh/ano)	237129
<b>Hidrólise Enzimática</b>	Enzima utilizada (t/ano)	1840
	Água presente (t/ano)	1681018
	Carga de sólidos	20%
	Corrente de açúcares (t/ano):	
	Glicose	268175
	Xilose	12009
	Água	1484431
	Concentração da corrente de açúcares (g/l)	188,7
	Corrente lignina hidrólise (t/ano):	
	Lignina	68392
	Celulose	70474
	Hemicelulose	29463
	Água	168329
	Consumo de energia elétrica (MWh/ano)	14032
<b>Fermentação</b>	Levedura utilizada (t/ano)	4539
	Nutrientes utilizados (t/ano)	1861
	Água adicionada (t/ano)	187724
	Concentração da corrente de açúcares p/fermentação (g/l)	167,6
	Corrente de etanol 12,2 vol% (t/ano):	
	Etanol	143174
	Água	1304285
	CO <sub>2</sub> emitido (t/ano)	136949
	Consumo de energia elétrica (MWh/ano)	3138
<b>Destilação</b>	Etanol hidratado produzido (m <sup>3</sup> /ano)	181233
	Razão etanol/biomassa seca (gal/t)	67,5

**Tabela 9.1:** Balanço de massa e energia detalhado para o caso base da Rota A (cont.)

	Etanol reciclado (t/ano)	13707
	Etanol vendido ou convertido em CA (t/ano)	129467
	Etanol vendido ou convertido em CA (m³/ano)	163883
	Corrente de vinhaça (t/ano)	1295224
	Consumo de vapor de baixa pressão (MWh/ano)	166798
<b>ATJ</b>	Etileno produzido na desidratação (t/ano)	75091
	CA insaturado produzido na oligomerização (t/ano)	72087
	Etileno não convertido (t/ano)	3004
	CA produzido na hidrogenação (t/ano)	72946
	CA produzida (m³/ano)	97261
	Hidrogênio requerido (t/ano)	3890
	Gás natural necessário (t/ano)	11212
	Consumo de energia elétrica (MWh/ano)	13227
	Consumo de vapor de baixa pressão (MWh/ano)	138708
<b>Tratamento de efluentes</b>	Efluentes da biorrefinaria (m³/h)	578,3
	Impacto na unidade de trat. de efluentes kraft	17%
<b>Armazenamento</b>	CA a ser armazenado (Mgal/ano)	25,7
<b>Integração com a usina kraft</b>	Fase 1:	
	Retirada de vapor de baixa pressão (t/h)	41,9
	Retirada de vapor de média pressão (t/h)	35,1
	Retirada de energia elétrica (MW)	15,3
	Fase 2:	
	Retirada de vapor de baixa pressão (t/h)	63,2
	Retirada de vapor de média pressão (t/h)	35,1
	Retirada de energia elétrica (MW)	16,8

**Tabela 9.2:** Balanço econômico detalhado para o caso base da Rota A

Tipo de Custo		Fase 1	Fase 2
<b>Dados Gerais</b>	CAPEX (MUS\$):		
	Pátio de madeira	2,3	-
	Turbina à vapor	7,6	-
	Caldeira auxiliar	33,0	-
	Capital de Giro (MUS\$)	2,1	-
	OPEX (MUS\$/ano):		
	Manutenção	0,9	0,9
	Mão de obra	0,4	0,4
	Biomassa	47,5	47,5
	Energia elétrica	-	7,8
<b>Pré-Tratamento (Organosolv)</b>	Receitas (MUS\$/ano):		
	Energia elétrica	6,1	-
	CAPEX (MUS\$)	100,9	-
	Capital de Giro (MUS\$)	5,0	-
	OPEX (MUS\$/ano):		
	Manutenção	2,0	2,0
	Mão de obra	1,0	1,0
	Receitas (MUS\$/ano):		
	Lignina organosolv	-	63,3
<b>Hidrólise Enzimática</b>	CAPEX (MUS\$)	19,7	-
	Capital de Giro (MUS\$)	1,0	-
	OPEX (MUS\$/ano):		
	Manutenção	0,4	0,4
	Mão de obra	0,2	0,2
	Enzima	9,0	9,0

**Tabela 9.2:** Balanço econômico detalhado para o caso base da Rota A (cont.)

<b>Fermentação</b>	CAPEX (MUS\$)	14,9	-
	Capital de Giro (MUS\$)	0,7	-
	OPEX (MUS\$/ano):		
	Manutenção	0,3	0,3
	Mão de obra	0,1	0,1
	Levedura	0,09	0,09
<b>Destilação</b>	CAPEX (MUS\$)	12,8	-
	Capital de Giro (MUS\$)	0,6	-
	OPEX (MUS\$/ano):		
	Manutenção	0,3	0,3
	Mão de obra	0,1	0,1
	Receitas (MUS\$/ano):		
	Etanol hidratado	80,0	-
<b>ATJ</b>	CAPEX (MUS\$)	-	79,8
	Capital de Giro (MUS\$)	-	4,0
	OPEX (MUS\$/ano):		
	Manutenção	-	1,6
	Mão de obra	-	0,8
	Gás natural	-	4,0
	Catalisadores	-	7,8
	Receitas (MUS\$/ano):		
	Combustível de aviação	-	170,6
<b>Tratamento de efluentes</b>	Etileno não convertido	-	3,8
	CAPEX (MUS\$)	11,1	-
	Capital de Giro (MUS\$)	0,6	-
	OPEX (MUS\$/ano):		
	Manutenção	0,2	0,2
	Mão de obra	0,1	0,1

**Tabela 9.2:** Balanço econômico detalhado para o caso base da Rota A (cont.)

		Operação	1,0	1,0
<b>Armazenamento</b>	CAPEX (MUS\$)		10,3	-
	Capital de Giro (MUS\$)		0,5	-
	OPEX (MUS\$/ano):			
		Manutenção	0,2	0,2
		Mão de obra	0,1	0,1

**Tabela 9.3:** Resultado detalhado da ACV para o caso base da Rota A

Parâmetro	Identificação na base de dados Ecoinvent	GWP (kg CO <sub>2</sub> eq./ano)	GWP (g CO <sub>2</sub> eq./MJ)
Biomassa	wood chips production, hardwood, at sawmill   wood chips, wet, measured as dry mass   cut-off, U - RoW	2,4E7	7,5
Energia elétrica kraft	linerboard production, kraftliner   electricity, medium voltage   cut-off, U - RoW	4,1E7	12,9
Solução H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	sulfuric acid production   sulfuric acid   cut-off, U - RoW	7,3E3	0,002
Enzima	Liptow <i>et al.</i> (2013)	1,7E7	5,3
Levedura	market for whey   whey   cut-off, U - GLO	7,6E5	0,2
Catalisadores	aluminium oxide production   aluminium oxide   cut-off, U - GLO	8,1E3	0,003
	zeolite production, powder   zeolite, powder   cut-off, U - RoW	2,7E4	0,009
Gás natural	natural gas production   natural gas, high pressure   cut-off, U - RoW	4,0E6	1,3
Água de processo	water production and supply, decarbonised   water, decarbonised, at user   cut-off, U - RoW	4,3E4	0,014
Tratamento de efluentes	treatment of wastewater, unpolluted, capacity 5E9l/year   wastewater, unpolluted   cut-off, U - RoW	1,5E6	0,5
Transporte	transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3   transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3   cut-off, U - RoW	4,0E7	12,6
Energia elétrica gerada (mix)	electricity, high voltage, production mix   electricity, high voltage   cut-off, U - BR	-2,1E7	-6,8
Lignina (fenol)	phenol production   phenol   cut-off, U - RoW	-3,1E7	-9,8
Etanol reciclado	ethanol production from sugarcane   ethanol, without water, in 95% solution state, from fermentation   cut-off, U - BR	-5,1E7	-16,0
Etileno	ethylene production, average   ethylene, average   cut-off, U - RoW	-4,4E6	-1,4
<b>TOTAL</b>		2,0E7	6,3
Energia elétrica gerada (hidro)	electricity production, hydro, reservoir, tropical region   electricity, high voltage   cut-off, U	-8,9E6	-2,8



**Tabela 9.3:** Resultado detalhado da ACV para o caso base da Rota A (cont.)

Energia elétrica gerada (GN)	electricity production, natural gas, conventional power plant   electricity, high voltage   cut-off, U	-6,7E7	-21,3
---------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------	-------

## 10 Apêndice B: Rotas B

**Tabela 10.1:** Balanço de massa e energia detalhado para os casos bases das Rotas B (Normal) e (GMO)

		Normal	GMO
<b>Dados Gerais</b>	Biomassa disponível (t/ano)	708000	
	Biomassa em base seca “perdida” (t/ano)	22656	
	Biomassa em base seca alimentada (t/ano)	685344	
	Biomassa em base úmida alimentada (t/ano)	1370688	
	Composição mássica da biomassa seca (t/ano):		
		Celulose	311832
		Hemicelulose	139125
		Lignina (t/ano)	203547
		Extrativos (t/ano)	30840
<b>Pré-Tratamento (Organosolv)</b>	Solvente utilizado (t/ano):	5482752	
		Etanol no solvente utilizado	2741376
		Água no solvente utilizado	2741376
	Etanol recuperado (t/ano)	2727669	
	Etanol perdido (t/ano)	13707	
	Solução 1% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> utilizada (t/ano)	6442	
	Corrente para hidrólise enzimática (t/ano):		
		Celulose	311832
		Hemicelulose	40031
		Lignina	68392
	Corrente lignina organosolv (t/ano):		
		Lignina	121721
		Água	6406
	Corrente de líquido sobrenadante (t/ano):		
		Açúcares C5	54537
		Lignina	13434
		Outros produtos da hemicelulose	44557
		Extrativos	30840

**Tabela 10.1:** Balanço de massa e energia detalhado para os casos bases das Rotas B (Normal) e (GMO) (cont.)

<b>Hidrólise Enzimática</b>	Água	3420314	
	Consumo de energia elétrica (MWh/ano)	112396	
	Consumo de vapor de baixa pressão (MWh/ano)	106914	
	Consumo de vapor de média pressão (MWh/ano)	237129	
	Enzima utilizada (t/ano)	1840	
	Água presente (t/ano)	1681018	
	Carga de sólidos	20%	
	Corrente de açúcares (t/ano):	268175	
	Glicose		
	Xilose	12009	
	Água (t/ano)	1484431	
	Concentração da corrente de açúcares (g/l)	188,7	
	Corrente lignina hidrólise (t/ano):		
	Lignina	68392	
	Celulose	70474	
<b>Fermentação ABE + Destilação</b>	Hemicelulose	29463	
	Água	168329	
	Consumo de energia elétrica (MWh/ano)	14032	
	Concentração da corrente de açúcares p/fermentação (g/l)	60,0	
	Corrente de produtos (t/ano):		
	N-butanol	52875	79672
	Acetona	26437	21246
	Etanol hidratado	5287	2656
	Corrente de produtos (m³/ano):		
	N-butanol	65277	98361
	Acetona	33423	26860
	Etanol hidratado	6693	3362
	Corrente de emissões (t/ano):		
	Quantidade de CO <sub>2</sub> produzida	139505	170794

**Tabela 10.1:** Balanço de massa e energia detalhado para os casos bases das Rotas B (Normal) e (GMO) (cont.)

		Quantidade de H <sub>2</sub> produzida	4315	5282
		Concentração de n-butanol (g/l)	11,3	17,1
		Quantidade de vinhaça produzida (m <sup>3</sup> /ano)	5137682	5445674
		Quantidade de etanol reciclada (t/ano)	5287	2656
		Consumo de vapor de baixa pressão (MWh/ano)	388349	459061
<b>ATJ</b>	Buteno produzido na desidratação (t/ano)		40027	60313
	CA insaturado produzido na oligomerização (t/ano)		40027	60313
	CA produzido na hidrogenação (t/ano)		40504	61031
	CA produzido (m <sup>3</sup> /ano)		54005	81375
	Hidrogênio requerido (t/ano)		2160	3255
	Gás natural necessário (t/ano)		6225	9380
	Consumo de energia elétrica (MWh/ano)		7345	11067
	Consumo de vapor de baixa pressão (MWh/ano)		77018	116052
<b>Tratamento de efluentes</b>	Efluentes da biorrefinaria (m <sup>3</sup> /h)		1025,7	1062,7
	Impacto na unidade de trat. de efluentes kraft		30,2%	31,3%
<b>Armazenamento</b>	CA a ser armazenado (Mgal/ano)		14,2	21,5
<b>Integração com a usina kraft</b>	Fase 1:			
		Retirada de vapor de baixa pressão (t/h)	75,9	86,7
		Retirada de vapor de média pressão (t/h)	35,1	35,1
		Retirada de energia elétrica (MW)	14,9	14,9
	Fase 2:			
		Retirada de vapor de baixa pressão (t/h)	87,7	104,5
		Retirada de vapor de média pressão (t/h)	35,1	35,1
		Retirada de energia elétrica (MW)	15,7	16,2

**Tabela 10.2:** Balanço econômico detalhado para os casos bases das Rotas B (Normal) e (GMO)

		Normal		GMO	
Tipo de Custo		Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2
Dados Gerais	CAPEX (MUS\$):				
	Pátio de madeira	2,3	-	2,3	-
	Turbina à vapor	7,6	-	7,6	-
	Caldeira auxiliar	33,0	-	33,0	-
	Capital de Giro (MUS\$)	2,1	-	2,1	-
	OPEX (MUS\$/ano):				
	Manutenção	0,9	0,9	0,9	0,9
	Mão de obra	0,4	0,4	0,4	0,4
	Biomassa	47,5	47,5	47,5	47,5
	Energia elétrica	-	8,8	-	10,1
Pré-Tratamento (Organosolv)	Receitas (MUS\$/ano):				
	Energia elétrica	4,1	-	3,4	-
	CAPEX (MUS\$)	100,9	-	100,9	-
	Capital de Giro (MUS\$)	5,0	-	5,0	-
	OPEX (MUS\$/ano):				
	Manutenção	2,0	2,0	2,0	2,0
	Mão de obra	1,0	1,0	1,0	1,0
Hidrólise Enzimática	Etanol	5,2	5,2	6,8	6,8
	Receitas (MUS\$/ano):				
	Lignina organosolv	-	63,3	-	63,3
	CAPEX (MUS\$)	19,7	-	19,7	-
	Capital de Giro (MUS\$)	1,0	-	1,0	-
	OPEX (MUS\$/ano):				
	Manutenção	0,4	0,4	0,4	0,4
	Mão de obra	0,2	0,2	0,2	0,2
	Enzima	9,0	9,0	9,0	9,0

**Tabela 10.2:** Balanço econômico detalhado para os casos bases das Rotas B (Normal) e (GMO) (cont.)

<b>Fermentação ABE + Destilação</b>	CAPEX Fermentação ABE (MUS\$)	35,3	-	39,8	-
	CAPEX Destilação (MUS\$)	19,0	-	21,4	-
	Capital de Giro (MUS\$)	2,7	-	3,1	-
	OPEX (MUS\$/ano):				
	Manutenção	1,1	1,1	1,2	1,2
	Mão de obra	0,5	0,5	0,6	0,6
	Microorganismo	-	-	1,6	1,6
	Receitas (MUS\$/ano):				
	N-butanol	64,0	-	96,4	-
	Acetona	27,8	27,8	22,3	22,3
<b>ATJ</b>	CAPEX (MUS\$)	-	40,6	-	52,0
	Capital de Giro (MUS\$)	-	2,0	-	2,6
	OPEX (MUS\$/ano):				
	Manutenção	-	0,8	-	1,0
	Mão de obra	-	0,4	-	0,5
	Gás natural	-	2,2	-	3,4
	Catalisadores	-	4,3	-	6,5
	Receitas (MUS\$/ano):				
	Combustível de aviação	-	153,0	-	142,0
<b>Tratamento de efluentes</b>	CAPEX (MUS\$)	15,7	-	16,0	-
	Capital de Giro (MUS\$)	0,8	-	0,8	-
	OPEX (MUS\$/ano):				
	Manutenção	0,3	0,3	0,3	0,3
	Mão de obra	0,2	0,2	0,2	0,2
	Operação	1,7	1,7	1,8	1,8
<b>Armazenamento</b>	CAPEX (MUS\$)	7,5	-	8,4	-
	Capital de Giro (MUS\$)	0,4	-	0,4	-
	OPEX (MUS\$/ano):				

**Tabela 10.2:** Balanço econômico detalhado para os casos bases das Rotas B (Normal) e (GMO) (cont.)

	Manutenção	0,1	0,1	0,2	0,2
	Mão de obra	0,1	0,1	0,1	0,1

**Tabela 10.3:** Resultado detalhado da ACV para o caso base da Rota B (Normal)

Parâmetro	Identificação na base de dados Ecoinvent	GWP (kg CO <sub>2</sub> eq./ano)	GWP (g CO <sub>2</sub> eq./MJ)
Biomassa	wood chips production, hardwood, at sawmill   wood chips, wet, measured as dry mass   cut-off, U - RoW	2,4E7	13,5
Energia elétrica kraft	linerboard production, kraftliner   electricity, medium voltage   cut-off, U - RoW	4,6E7	26,3
Solução H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	sulfuric acid production   sulfuric acid   cut-off, U - RoW	7,3E3	0,004
Make up etanol	ethanol production from sugarcane   ethanol, without water, in 95% solution state, from fermentation   cut-off, U - BR	3,1E7	17,7
Enzima	Liptow <i>et al.</i> (2013)	1,7E7	9,5
Microrganismo	market for whey   whey   cut-off, U - GLO	1,7E6	1,0
Catalisadores	aluminium oxide production   aluminium oxide   cut-off, U - GLO	3,3E3	0,002
	zeolite production, powder   zeolite, powder   cut-off, U - RoW	1,1E4	0,006
Gás natural	natural gas production   natural gas, high pressure   cut-off, U - RoW	2,2E6	1,3
Água de processo	water production and supply, decarbonised   water, decarbonised, at user   cut-off, U - RoW	4,1E4	0,02
Tratamento de efluentes	treatment of wastewater, unpolluted, capacity 5E9l/year   wastewater, unpolluted   cut-off, U - RoW	2,6E6	1,5
Transporte	transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3   transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3   cut-off, U - RoW	2,2E7	12,8
Energia elétrica gerada (mix)	electricity, high voltage, production mix   electricity, high voltage   cut-off, U - BR	-2,1E7	-12,2
Lignina (fenol)	phenol production   phenol   cut-off, U - RoW	-3,1E7	-17,6
Etanol reciclado	ethanol production from sugarcane   ethanol, without water, in 95% solution state, from fermentation   cut-off, U - BR	-2,0E7	-11,1
Acetona	acetone production, liquid   acetone, liquid   cut-off, U - RoW	-6,1E7	-35,0
<b>TOTAL</b>		1,3E7	7,6



**Tabela 10.3:** Resultado detalhado da ACV para o caso base da Rota B (Normal) (cont.)

Energia eléctrica gerada (hidro)	electricity production, hydro, reservoir, tropical region   electricity, high voltage   cut-off, U	-8,9E6	-5,1
Energia eléctrica gerada (GN)	electricity production, natural gas, conventional power plant   electricity, high voltage   cut-off, U	-6,7E7	-38,3

**Tabela 10.4:** Resultado detalhado da ACV para o caso base da Rota B (GMO)

Parâmetro	Identificação na base de dados Ecoinvent	GWP (kg CO <sub>2</sub> eq./ano)	GWP (g CO <sub>2</sub> eq./MJ)
Biomassa	wood chips production, hardwood, at sawmill   wood chips, wet, measured as dry mass   cut-off, U - RoW	2,4E7	9,0
Energia elétrica kraft	linerboard production, kraftliner   electricity, medium voltage   cut-off, U - RoW	5,0E7	19,0
Solução H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	sulfuric acid production   sulfuric acid   cut-off, U - RoW	7,3E3	0,003
Make up etanol	ethanol production from sugarcane   ethanol, without water, in 95% solution state, from fermentation   cut-off, U - BR	4,1E7	15,4
Enzima	Liptow <i>et al.</i> (2013)	1,7E7	6,3
Microrganismo	market for whey   whey   cut-off, U - GLO	1,8E6	0,7
Catalisadores	aluminium oxide production   aluminium oxide   cut-off, U - GLO	5,0E3	0,002
	zeolite production, powder   zeolite, powder   cut-off, U - RoW	1,7E4	0,006
Gás natural	natural gas production   natural gas, high pressure   cut-off, U - RoW	3,3E6	1,3
Água de processo	water production and supply, decarbonised   water, decarbonised, at user   cut-off, U - RoW	4,1E4	0,02
Tratamento de efluentes	treatment of wastewater, unpolluted, capacity 5E9l/year   wastewater, unpolluted   cut-off, U - RoW	2,7E6	1,0
Transporte	transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3   transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3   cut-off, U - RoW	3,3E7	12,6
Energia elétrica gerada (mix)	electricity, high voltage, production mix   electricity, high voltage   cut-off, U - BR	-2,0E7	-7,5
Lignina (fenol)	phenol production   phenol   cut-off, U - RoW	-3,1E7	-11,7
Etanol reciclado	ethanol production from sugarcane   ethanol, without water, in 95% solution state, from fermentation   cut-off, U - BR	-9,8E6	-3,7
Acetona	acetone production, liquid   acetone, liquid   cut-off, U - RoW	-4,9E7	-18,7
<b>TOTAL</b>		6,2E7	23,7

**Tabela 10.4:** Resultado detalhado da ACV para o caso base da Rota B (GMO) (cont.)

Energia elétrica gerada (hidro)	electricity production, hydro, reservoir, tropical region   electricity, high voltage   cut-off, U	-8,2E6	-3,1
Energia elétrica gerada (GN)	electricity production, natural gas, conventional power plant   electricity, high voltage   cut-off, U	-6,2E7	-23,4

## 11 Apêndice C: Rota C

**Tabela 11.1:** Balanço de massa e energia detalhado para o caso base da Rota C

<b>Lignoboost</b>	Lignina extraída (t/ano)	100000
	CO <sub>2</sub> utilizado (t/ano)	31429
	Ácido sulfúrico utilizado (t/ano)	20000
	Água de lavagem (t/ano)	285714
	Consumo de energia elétrica (MWh/ano)	11714
<b>Hidrodesoxigenação Catalítica</b>	CA produzido (t/ano)	17689
	CA produzido (m <sup>3</sup> /ano)	23585
	Lignina não convertida (t/ano)	18970
	Outros hidrocarbonetos gerados (t/ano)	63341
	Consumo de energia elétrica (MWh/ano)	2359
	Consumo de vapor de baixa pressão (MWh/ano)	26227
<b>Tratamento de efluentes</b>	Efluentes da biorrefinaria (m <sup>3</sup> /h)	368,2
	Impacto na unidade de trat. de efluentes kraft	10,8%
<b>Armazenamento</b>	CA a ser armazenado (Mgal)/ano	6,2
<b>Integração com a usina kraft</b>	Fase 1:	
	Retirada de vapor de baixa pressão (t/h)	-
	Retirada de energia elétrica (MW)	1,4
	Madeira de eucalipto adicional (t/dia)	668
	Polpa celulósica adicional (adt/ano)	123127
	Fase 2:	
	Retirada de vapor de baixa pressão (t/h)	4,0
	Retirada de energia elétrica (MW)	1,7
	Madeira de eucalipto adicional (t/dia)	668
	Polpa celulósica adicional (adt/ano)	123127

**Tabela 11.2:** Balanço econômico detalhado para o caso base da Rota C

	<b>Tipo de Custo</b>	<b>Fase 1</b>	<b>Fase 2</b>
<b>Dados Gerais</b>	CAPEX (MUS\$):		
	Pátio de madeira	1,2	-
	Turbina à vapor	5,5	-
	Caldeira auxiliar	23,9	-
	Capital de Giro (MUS\$)	1,5	-
	OPEX (MUS\$/ano):		
	Manutenção	0,6	0,6
	Mão de obra	0,3	0,3
	Biomassa adicional	15,2	15,2
	OPEX polpa adicional	8,4	8,4
	Energia elétrica	-	3,2
	Receitas (MUS\$/ano):		
	Polpa celulósica adicional	89,9	89,9
<b>Lignoboost</b>	CAPEX (MUS\$)	37,9	-
	Capital de Giro (MUS\$)	1,9	-
	OPEX (MUS\$/ano):		
	Manutenção	0,8	0,8
	Mão de obra	0,4	0,4
	CO <sub>2</sub>	2,3	2,3
	Ácido sulfúrico	1,0	1,0
<b>Hidrodesoxigenação Catalítica<sup>a</sup></b>	CAPEX (MUS\$)	-	75,5
	Capital de Giro (MUS\$)	-	3,8
	OPEX (MUS\$/ano):		
	Manutenção	-	1,5
	Mão de obra	-	0,8
	Catalisadores	-	1,9
	Receitas (MUS\$/ano):		
	Combustível de aviação <sup>b</sup>	-	68,8

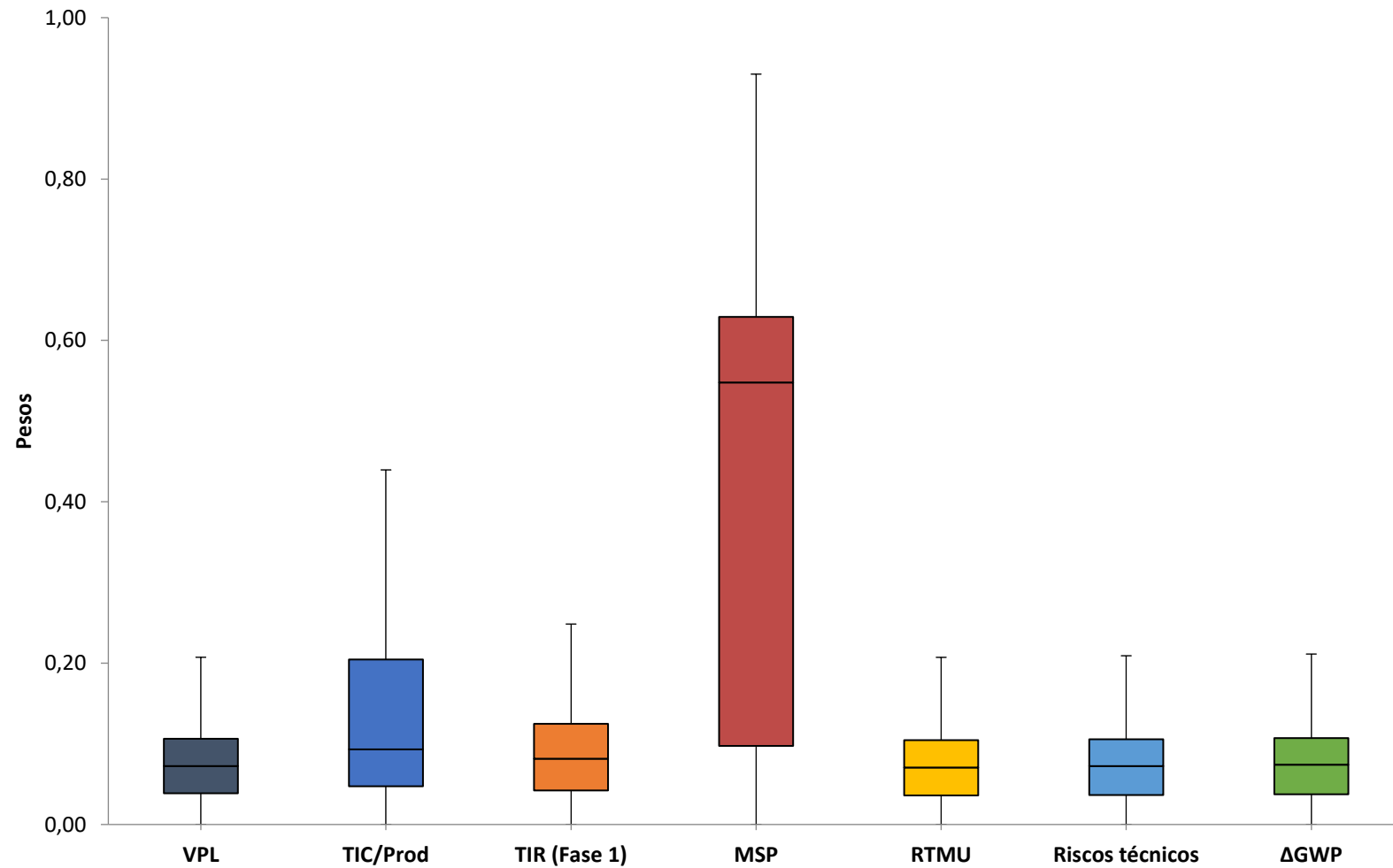
**Tabela 11.2:** Balanço econômico detalhado para o caso base da Rota C (cont.)

<b>Tratamento de efluentes</b>	CAPEX (MUS\$)	8,5	-
	Capital de Giro (MUS\$)	0,4	-
	OPEX (MUS\$/ano):		
	Manutenção	0,2	0,2
	Mão de obra	0,1	0,1
<b>Armazenamento</b>	Operação	0,1	0,1
	CAPEX (MUS\$)	-	3,0
	Capital de Giro (MUS\$)	-	0,2
	OPEX (MUS\$/ano):		
	Manutenção	-	0,1
	Mão de obra	-	0,03

<sup>a</sup>Se houvesse implantação da unidade LTJ (Fase 2 do projeto)

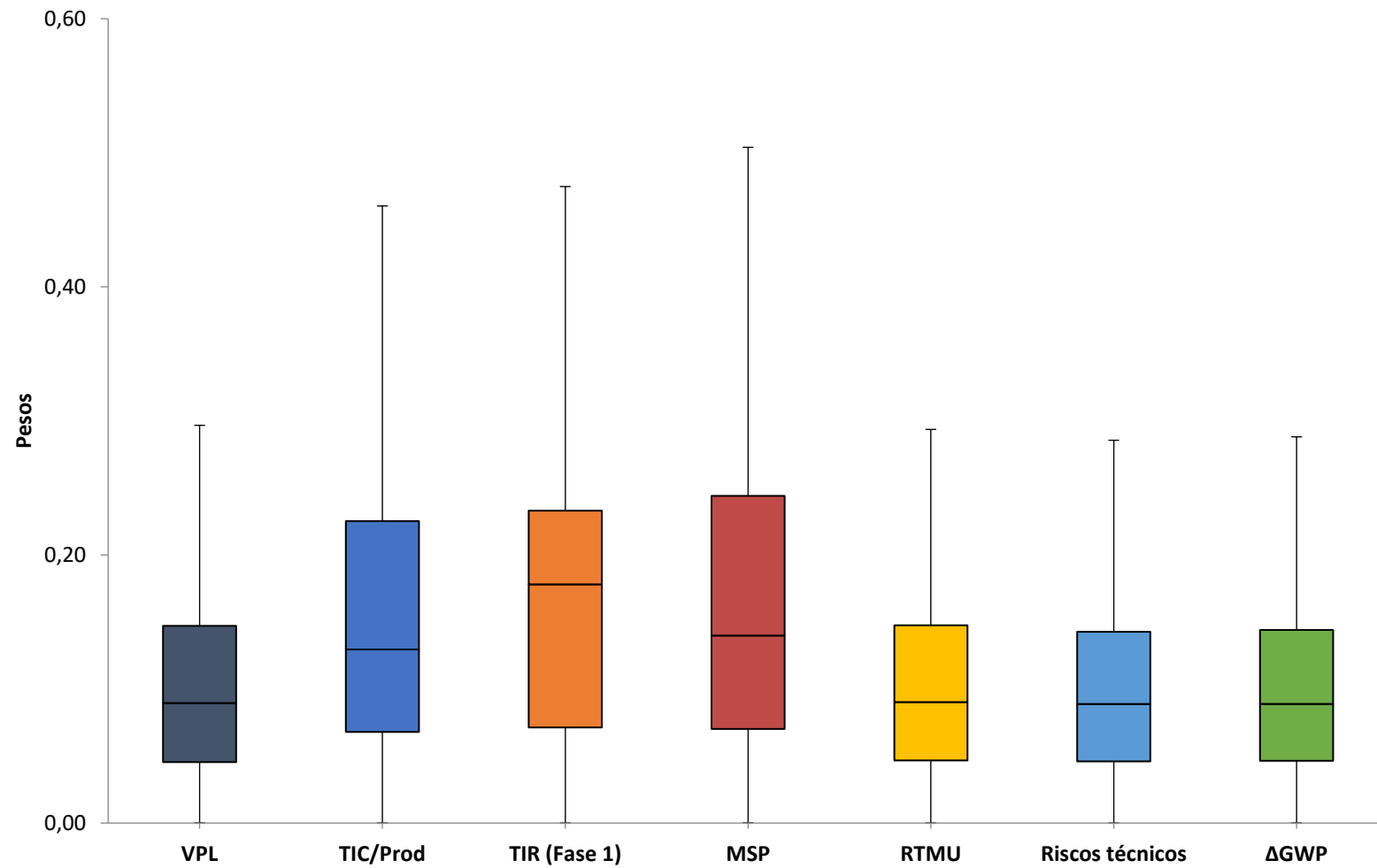
<sup>b</sup>Considerando MSP de 2,92 US\$/l de CA, a fim de igualar a TIR de 50,7% obtida com a Fase 1 durante os 25 anos de operação

## 12 Apêndice D: MCDM



**Figura 12.1:** Distribuição, em *boxplot*\*, obtida para os pesos de cada critério na simulação Monte Carlo da MCDM, sendo o MSP o parâmetro central da distribuição triangular

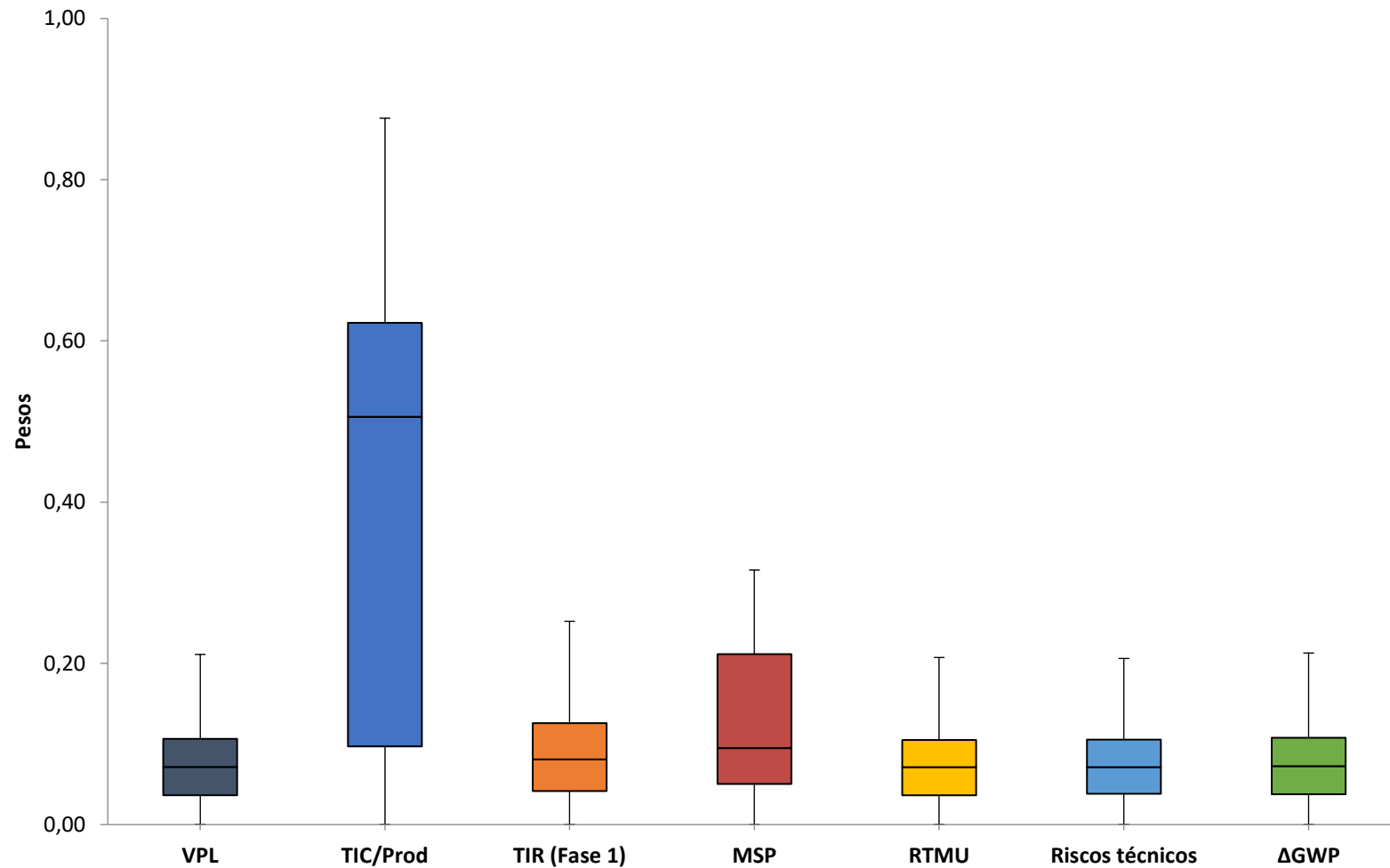
\*Sequência ascendente do *boxplot*: menor valor excluindo *outliers*, 1º quartil, mediana, 3º quartil e maior valor excluindo *outliers*



**Figura 12.2:** Distribuição, em *boxplot*\*, obtida para os pesos de cada critério na simulação Monte Carlo da MCDM, sendo a TIR (Fase 1) o parâmetro central da distribuição triangular

\*Sequência ascendente do *boxplot*: menor valor excluindo *outliers*, 1º quartil, mediana, 3º quartil e maior valor excluindo *outliers*





**Figura 12.3:** Distribuição, em *boxplot*\*, obtida para os pesos de cada critério na simulação Monte Carlo da MCDM, sendo a razão TIC/Produção o parâmetro central da distribuição triangular

\*Sequência ascendente do *boxplot*: menor valor excluindo *outliers*, 1º quartil, mediana, 3º quartil e maior valor excluindo *outliers*